



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN PENGGERAK MOTOR *BRUSHLESS DC FOUR SWITCH* DENGAN PENGATURAN KECEPATAN SKALAR

Tyas Sarnaning Maharani
NRP 07111440000038

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph. D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN PENGGERAK MOTOR *BRUSHLESS DC FOUR SWITCH* DENGAN PENGATURAN KECEPATAN SKALAR

Tyas Sarnaning Maharani
NRP 07111440000038

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.
Daniar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

DESIGN OF FOUR SWITCH BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE WITH SCALAR SPEED CONTROL

Tyas Sarnaning Maharani
NRP 07111440000038

Supervisors

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

Daniar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

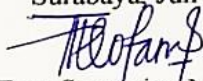
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**DESAIN PENGGERAK MOTOR *BRUSHLESS DC FOUR SWITCH* DENGAN PENGATURAN KECEPATAN SKALAR**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018



Tyas Sarnaning Maharani
07111440000038

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN PENGGERAK MOTOR *BRUSHLESS DC*
FOUR SWITCH DENGAN PENGATURAN
KECEPATAN SKALAR**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

 17/07/18

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001

Dosen Pembimbing II



Daniar Fahmi, S.T., M.T.
NIP. 198909252014041002



Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN PENGGERAK MOTOR *BRUSHLESS DC FOUR SWITCH* DENGAN PENGATURAN KECEPATAN SKALAR

Tyas Sarnaning Maharani
0711144000038

Dosen Pembimbing I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Motor BLDC banyak diaplikasikan di industri-industri karena selain efisiensi dan keandalannya yang tinggi, motor BLDC juga memiliki konstruksi sederhana dan pemeliharaan yang mudah. Selain itu, motor BLDC juga diaplikasikan pada kendaraan listrik dan kendaraan *hybrid* dalam rangka penghematan bahan bakar dan pelestarian lingkungan, salah satunya adalah motor listrik GESITS. Karena motor BLDC sebagai motor listrik mulai banyak diaplikasikan, maka perlu dilakukannya pengaturan kecepatan agar dapat menghasilkan performa yang diinginkan.

Pada tugas akhir ini, akan dibahas tentang salah satu metode pengaturan kecepatan yaitu metode skalar dan pengurangan jumlah sakelar pada VSI. Kontrol kecepatan skalar untuk motor BLDC dengan FSTPI memiliki kekurangan yaitu membutuhkan sumber tegangan lebih besar daripada motor BLDC dengan SSTPI untuk mencapai kecepatan yang sama. Dengan nilai catu daya yang sama, motor BLDC dengan FSTPI hanya bisa mencapai 52,89% kecepatan motor BLDC dengan SSTPI pada kondisi beban penuh. Kontrol kecepatan skalar dengan FSTPI tidak cocok untuk motor dengan daya yang besar karena membutuhkan kapasitor yang besar pula.

Kata kunci: *four switch three phase inverter* (FSTPI), kendaraan listrik, kontrol kecepatan skalar, motor *brushless DC*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF FOUR SWITCH BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE WITH SCALAR SPEED CONTROL

Tyas Sarnaning Maharani
07111440000038

Supervisor I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D
Supervisor II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRACT

BLDC motors are widely applied in industries because of their high efficiency and reliability and also have simple construction and easy maintenance. In addition, BLDC motors are also applied to electric vehicles and hybrid vehicles in order to save fuel and environmental conservation, one of it is the GESITS motor. Because the BLDC motor as an electric vehicle starts to be applied, it is necessary to control its speed in order to produce the desired performance.

In this final project, we will discuss about one of the speed control method that is scalar method and switch reduction on VSI. The scalar speed control for the BLDC motor with FSTPI has the disadvantage of requiring a larger voltage source than the BLDC motor with SSTPI to achieve the same speed. With the same power supply, BLDC motor with FSTPI can only achieve 52.89% speed of BLDC motor with SSTPI at full load condition. Scalar speed control with FSTPI is not suitable for motors with high power motor because it requires a large capacitor as well.

Key Word: four switch three phase inverter (FSTPI), electric vehicle, scalar speed control, brushless DC motor

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Desain Penggerak Motor *Brushless DC Four Switch* dengan Pengaturan Kecepatan Skalar**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu, Bapak, dan Adik penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun.
3. Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Daniar Fahmi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Partner BLDC, Mas Ridwan, I Wayan Wirasa, Agus Try Wahyudi, dan Ainur Fahrizal Yakin, yang sudah meluangkan waktunya untuk membantu Penulis dalam penyelesaian tugas akhir.
5. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi yang telah menemani dan mewarnai kehidupan kampus Penulis.
6. Teman-teman e54 dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 MOTOR BLDC DAN SISTEM PENGEMUDIAN.....	5
2.1 Motor <i>Brushless</i> DC (BLDC)	5
2.1.1 Prinsip Kerja Motor BLDC	6
2.1.2 Rangkaian Pengganti Motor BLDC.....	9
2.2 Kontrol Kecepatan Skalar	11
2.3 Inverter Tiga Fasa dengan Enam <i>Switch</i>	12
2.4 Inverter Tiga Fasa dengan Empat <i>Switch</i>	14
BAB 3 KONTROL SKALAR KECEPATAN MOTOR BLDC MENGUNAKAN 4-SWITCH VSI.....	21
3.1 Konfigurasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor BLDC.....	21
3.2 Pemodelan Kontrol VSI Berbasis Sensor Hall-Effect...	22
3.3 Penentuan Nilai Kapasitor	26
3.4 Perancangan Kontrol Kecepatan	28
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Simulasi Sistem <i>Open Loop</i> Motor BLDC	31
4.1.1 Motor BLDC dengan <i>Six Switch Three Phase Inverter</i> (SSTPI).....	31
4.2 Simulasi Sistem <i>Close loop</i> Motor BLDC.....	34

4.2.1	Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Tanpa Beban	36
4.2.2	Simulasi dengan Kecepatan Tetap Beban Berubah ...	39
4.2.3	Simulasi dengan Kecepatan Berubah Tanpa Beban...	44
4.2.4	Simulasi dengan Kecepatan Berubah Beban Tetap ...	48
BAB 5	PENUTUP.....	55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN.....		58
BIODATA PENULIS	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Jenis motor BLDC berdasarkan rotornya	6
Gambar 2.2	Skema proses berputarnya motor BLDC [6]	6
Gambar 2.3	Urutan komutasi pada motor BLDC [6].....	9
Gambar 2.4	Rangkaian pengganti motor BLDC.....	9
Gambar 2.5	Blok diagram V/f kontrol [8]	11
Gambar 2.6	Topologi SSTPI (<i>Six Switch Three Phase Inverter</i>) [9]	13
Gambar 2.7	Bentuk gelombang arus fasa dan tegangan <i>back-emf</i> , sensor hall, dan strategi penyakelaran pada SSTPI [7]	14
Gambar 2.8	Topologi FSTPI (<i>Four Switch Three Phase Inverter</i>) [9].....	14
Gambar 2.9	Bentuk gelombang arus fasa dan tegangan <i>back-emf</i> , sensor hall, dan strategi penyakelaran pada FSTPI [9]	15
Gambar 2.10	Rangkaian pengganti FSTPI pada setiap mode [10]...	16
Gambar 2.11	Rangkaian pengganti FSTPI mode 4, S3 on	17
Gambar 2.12	Bentuk Gelombang Arus Fasa C, Arus dan Tegangan Kapasitor C1 dan Kapasitor C2	19
Gambar 3.1	Konfigurasi sistem pengaturan kecepatan motor BLDC	21
Gambar 3.2	Skema sistem kontrol motor menggunakan VSI berbasis sensor <i>Hall-effect</i>	23
Gambar 3.3	Skema sistem kontrol motor menggunakan VSI berbasis sensor <i>Hall-effect</i>	24
Gambar 3.4	Diagram alir penerjemahan posisi rotor menjadi mode FSTPI	25
Gambar 3.5	Diagram alir penerjemahan mode menjadi strategi penyakelaran FSTPI	26
Gambar 3.6	Skema kontrol kecepatan.....	28
Gambar 4.1	Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>open loop</i>	31
Gambar 4.2	Tegangan <i>line to line</i> motor BLDC dengan SSTPI....	32
Gambar 4.3	Arus stator tiap fasa motor BLDC dengan SSTPI	32
Gambar 4.4	Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI	33
Gambar 4.5	Tegangan <i>line to line</i> motor BLDC dengan FSTPI....	34

Gambar 4.6	Arus tiap fasa motor BLDC dengan FSTPI	34
Gambar 4.7	Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i>	35
Gambar 4.8	Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i>	35
Gambar 4.9	Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> tanpa beban	36
Gambar 4.10	Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> kecepatan referensi tetap dan tanpa beban	37
Gambar 4.11	Torsi motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> tanpa beban	37
Gambar 4.12	Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> kecepatan referensi tetap dan tanpa beban	38
Gambar 4.13	Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> tanpa beban	38
Gambar 4.14	Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> tanpa beban	38
Gambar 4.15	(a) Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi tetap beban berubah (b) Perbesaran respon kecepatan	40
Gambar 4.16	(a) Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah (b) Arus pada rentang waktu 5,9-6,08 detik	40
Gambar 4.17	(a) Torsi motor BLDC dengan SSTPI dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah (b) Torsi pada rentang waktu 3,5-4,5 detik	41
Gambar 4.18	(a) Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah (b) Perbesaran respon kecepatan	42
Gambar 4.19	(a) Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah (b) Arus pada rentang waktu 5,9-6,1 detik	43
Gambar 4.20	(a) Torsi motor BLDC dengan SSTPI dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah (b) Torsi pada rentang waktu 3-5 detik	44

Gambar 4.21 Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> dengan referensi berubah tanpa beban.....	45
Gambar 4.22 (a) Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah dan tanpa beban (b) Arus pada rentang waktu 6,06-6,18 detik	45
Gambar 4.23 Torsi motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah dan tanpa beban	46
Gambar 4.24 Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah tanpa beban	476
Gambar 4.25 (a) Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> kecepatan referensi berubah dan tanpa beban (b) Arus pada rentang waktu 6,26-6,33 detik	47
Gambar 4.26 Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah dan tanpa beban	47
Gambar 4.27 Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah beban tetap.....	48
Gambar 4.28 (a) Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah dan beban tetap (b) Arus pada rentang 6,06-6,16 detik.....	49
Gambar 4.29 Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah dan beban tetap	49
Gambar 4.30 Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah beban tetap.....	50
Gambar 4.31 (a) Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah beban tetap (b) Arus pada rentang 6,26-6,33 detik	51
Gambar 4.32 Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem <i>close loop</i> dengan kecepatan referensi berubah beban tetap.....	51
Gambar 4.33 Gelombang tegangan kapasitor C1 dan C2	52

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter motor BLDC.....	22
Tabel 3.2 Urutan komutasi pada VSI enam <i>switch</i> berbasis sensor <i>hall-effect</i>	23
Tabel 3.3 Urutan komutasi pada VSI empat <i>switch</i> berbasis sensor <i>hall-effect</i>	25
Tabel 3.4 Mode pensaklaran pada VSI dengan empat sakelar	29
Tabel 4.1 Data simulasi karakteristik V/f.....	53

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor BLDC adalah motor DC tanpa sikat yang komutasinya dilakukan secara elektrik berdasarkan posisi rotornya [1]. Motor BLDC memiliki stator berupa belitan sedangkan rotornya adalah sebuah magnet permanen [2]. Motor BLDC bekerja dengan cara menyuplai tegangan AC tiga fasa pada statornya. Selanjutnya, komutasi elektris stator bergantung pada posisi rotornya. Hal ini bertujuan untuk menyesuaikan suplai tegangan dengan GGL balik agar motor dapat bekerja dengan performa yang maksimal [1]. Motor BLDC sangat banyak diaplikasikan pada bidang industri karena selain efisiensi dan keandalannya yang tinggi, motor BLDC juga memiliki konstruksi sederhana dan pemeliharaan yang mudah [2]. Selain itu, motor BLDC juga digunakan pada kendaraan listrik untuk menghemat bahan bakar minyak dan mengurangi polusi udara [3].

Karena sudah banyak diaplikasikan, salah satunya pada motor listrik GESITS, maka motor BLDC membutuhkan suatu kontrol kecepatan agar dapat menghasilkan performa yang diinginkan. Salah satu metode pengaturan kecepatan adalah dengan metode skalar, yaitu metode pengaturan kecepatan dengan prinsip kerja mempertahankan nilai perbandingan frekuensi dan tegangan output sistem. Metode ini sederhana, murah, dan cocok diaplikasikan pada motor dengan kecepatan menengah ke atas [4]. Kemudian untuk mengurangi biaya produksi dan rugi-rugi *switching*, dilakukanlah pengurangan *switch* dari *six-switch three phase inverter* (SSTPI) menjadi *four-switch three phase inverter* (FSTPI) [5].

Oleh karena itu, diusulkan judul tugas akhir desain penggerak motor BLDC 4-switch dengan pengaturan kecepatan skalar. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk membuat alternatif kontrol kecepatan bagi kendaraan listrik, dalam hal ini adalah motor listrik GESITS

1.2 Permasalahan

Motor BLDC membutuhkan suatu kontrol kecepatan agar dapat menghasilkan performa yang diinginkan. Aplikasi motor BLDC pada kendaraan listrik pada umumnya menggunakan *six switch*. Hal ini menyebabkan besarnya rugi-rugi penyaklaran dan biaya produksi yang

digunakan [5]. Oleh karena itu, permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah sistem kontrol kecepatan motor BLDC dengan metode skalar pada motor BLDC dengan *four switch*.

1.3 Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Melakukan reduksi *switch* pada motor BLDC.
2. Mendesain kontrol kecepatan motor BLDC dengan metode skalar.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Simulasi pemodelan serta analisis menggunakan perangkat lunak simulator MATLAB 2015b.
2. Motor yang digunakan adalah motor BLDC 5kW milik Tim Gesits.
3. Parameter motor didapatkan dari *datasheet* dari Tim Gesits.
4. Simulasi motor *brushless* DC dilakukan dengan pengaturan kecepatan referensi dari 800 rpm sampai 2000 rpm, serta simulasi torsi beban bervariasi dari 0.1 Nm sampai 11.1 Nm pada sistem.
5. Tidak disimulasikan *regenerative breaking*.
6. Nilai PID dicari dengan cara *trial and error*.
7. Menggunakan komponen-komponen ideal.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Studi literatur

Mengumpulkan buku, jurnal serta referensi yang berhubungan dengan dasar-dasar motor brushless DC yang mencakup prinsip kerja dan karakteristik motor, kontrol kecepatan skalar, dan *voltage source inverter* (VSI) dengan enam *switch* maupun empat *switch* untuk mengetahui prinsip kerjanya.

2. Perancangan Sistem

Pada tahap ini, menentukan parameter-parameter yang akan digunakan dalam perancangan sistem, mencakup kontrol kecepatan skalar pada BLDC, pemodelan VSI enam *switch* dan

empat *switch* dengan motor BLDC, serta penentuan nilai komponen kapasitor.

3. Simulasi Sistem

Tahap ini adalah tahap mensimulasikan sistem secara keseluruhan setelah menentukan parameter dan rancangan sistem. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB/Simulink. Data dan parameter yang didapat pada tahap perancangan sistem dimasukkan ke dalam komponen yang ada dan simulasi dilakukan.

4. Analisa Data

Melakukan analisa berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh. Analisa data yang diperoleh mengenai kinerja kontrol kecepatan skalar pada BLDC dengan VSI empat *switch*.

5. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Tahap ini merupakan tahap akhir dari serangkaian pelaksanaan tugas akhir. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis dari proses dan hasil kerja terkait topik yang diusulkan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi tugas akhir ini.

BAB 2 Motor BLDC dan Sistem Pengemudian

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang motor *Brushless DC* (BLDC), kontrol kecepatan skalar, VSI enam *switch* dan empat *switch*.

BAB 3 Kontrol Skalar Kecepatan Motor BLDC menggunakan *Four Switch Three Phase Inverter* (FSTPI).

Bab ini membahas mengenai pemodelan dan penentuan parameter sistem yang terdiri dari motor *brushless DC* dan inverter tiga fasa empat *switch*.

BAB 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini membahas hasil simulasi dan analisis dari hasil simulasi yang dilakukan.

BAB 5 Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi referensi penelitian bagi TIM GESITS dalam rangka pengembangan kualitas kontroler pada motor BLDC 5 kW.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan tugas akhir dengan topik pengaturan kecepatan skalar.

BAB 2

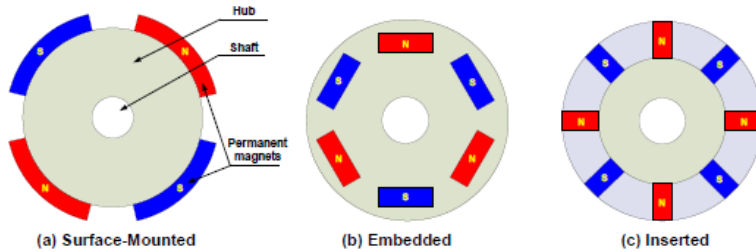
MOTOR BLDC DAN SISTEM PENGEMUDIAN

2.1 Motor *Brushless* DC (BLDC)

Motor *Brushless* DC (BLDC) telah banyak diaplikasikan pada bidang industri, karena keandalannya, efisiensi yang tinggi, kerapatan daya yang tinggi, pemeliharaan yang mudah dan murah, serta konstruksinya yang lebih sederhana dan ringan. Pada motor DC konvensional, arus dikonduksi ke koil menggunakan *brush* (sikat). Sedangkan pada motor BLDC, proses komutasi dilakukan oleh saklar elektronik yang melakukan proses konduksi arus berdasarkan posisi rotor. Posisi rotor sangat penting dalam proses komutasi, karena pemberian suplai saat posisi rotor sejajar dengan stator secara kontinyu akan menghasilkan putaran motor yang halus. Untuk mendapatkan informasi akan posisi rotor yang akurat, pada motor BLDC dipasang sensor Hall. Sensor ini akan membangkitkan sinyal tinggi atau rendah sebagai tanda bahwa kutub utara atau kutub selatan rotor telah melewatinya [2].

Konstruksi motor BLDC terdiri atas stator dan bagian rotor. Bagian stator merupakan bagian statis berupa kumparan motor. Pada umumnya terdapat dua jenis kumparan stator, yaitu kumparan trapezoidal dan sinusoidal. Bentuk kumparan yang digunakan akan mempengaruhi bentuk gelombang *back-emf*. Pada motor sinkron magnet permanen, digunakan bentuk kumparan sinusoidal. Sedangkan pada motor BLDC menggunakan bentuk kumparan trapezoidal, sehingga menghasilkan *back-emf* trapezoidal.

Bagian rotor merupakan bagian yang bergerak berupa magnet permanen. Terdapat beberapa jenis rotor motor BLDC seperti terlihat pada gambar 2.1, yaitu *surface mounted*, *embedded*, dan *inserted*. Pada *surface mounted* rotor, magnet permanen diletakkan pada permukaan rotor sehingga timbul kutub magnet yang menonjol. Pada *embedded* rotor, magnet permanen diletakkan di dalam hub sedangkan pada *inserted* rotor, magnet permanen disisipkan pada hub.



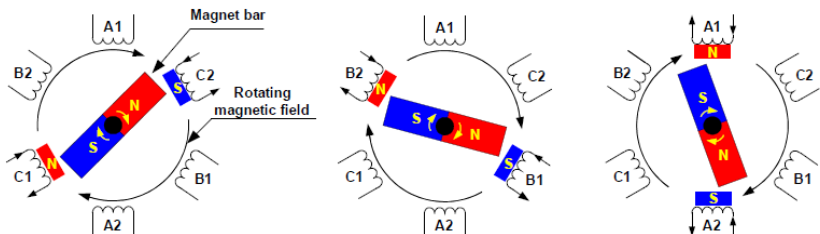
Gambar 2.1 Jenis motor BLDC berdasarkan rotornya

2.1.1 Prinsip Kerja Motor BLDC

Motor BLDC menggunakan prinsip gaya tarik menarik dan tolak menolak antarkutub magnet seperti terlihat pada gambar 2.2. Motor BLDC disuplai tegangan DC, kemudian arus yang mengalir di salah satu kumparan stator menghasilkan medan magnet elektris (B) sebesar

$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \quad (2.1)$$

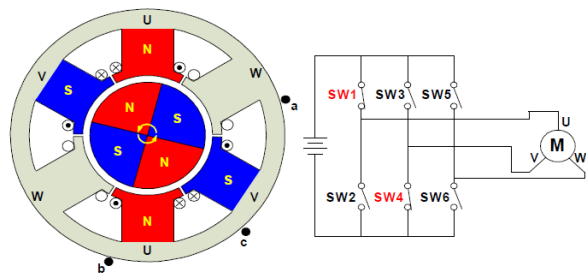
di mana μ merupakan permeabelitas bahan, N adalah jumlah lilitan, I adalah arus dan l adalah panjang lilitan. Medan magnet elektris akan menarik magnet permanen pada rotor. Arus yang disuplai ke kumparan stator dilakukan secara kontinyu sehingga menyebabkan rotor ikut berputar mengikuti medan putar stator. Putaran motor BLDC menghasilkan torsi yang besarnya sebanding dengan besar arus, jumlah belitan stator, kekuatan magnet permanen, celah udara antara rotor dan belitan, dan panjang shaft rotor.



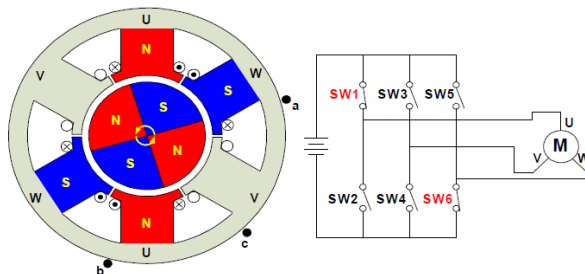
Gambar 2.2 Skema proses berputarnya motor BLDC [6]

Motor BLDC tiga fasa membutuhkan tiga sensor Hall untuk mendeteksi posisi rotor. Tujuan dari penggunaan sensor Hall adalah untuk mengetahui fasa mana yang harus dikomutasi agar terjadi kontinuitas putaran motor. Berdasarkan posisi mekanis sensor Hall, terdapat dua jenis pembacaan outputnya, yaitu pergeseran fasa 60° dan pergeseran fasa 120° .

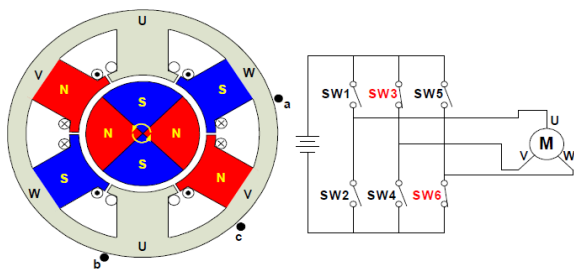
Pada gambar 2.3, diberikan ilustrasi tentang urutan komutasi motor BLDC tiga fasa untuk arah putar berlawanan dengan jarum jam. Sensor Hall A, B, dan C, diletakkan terpisah 120° dengan konfigurasi belitan stator bintang. Perubahan output dari sensor Hall terjadi setiap pergeseran posisi rotor sebesar 60° , sehingga membutuhkan enam variasi output sensor Hall untuk menyelesaikan satu putaran elektris. Pada setiap variasi output, terdapat tiga kondisi pada terminal motor BLDC, yaitu high (1), low (-1), dan floating (0).



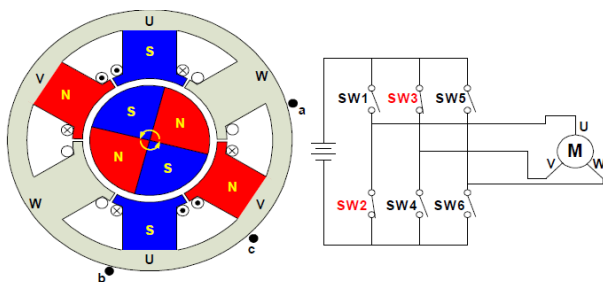
(a)



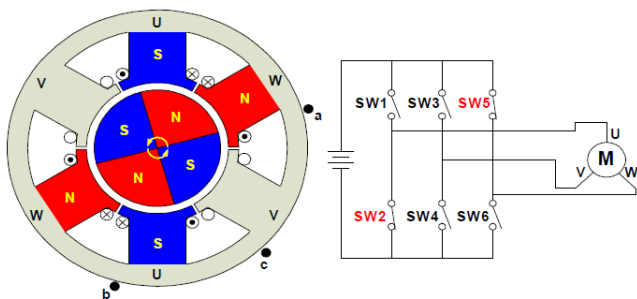
(b)



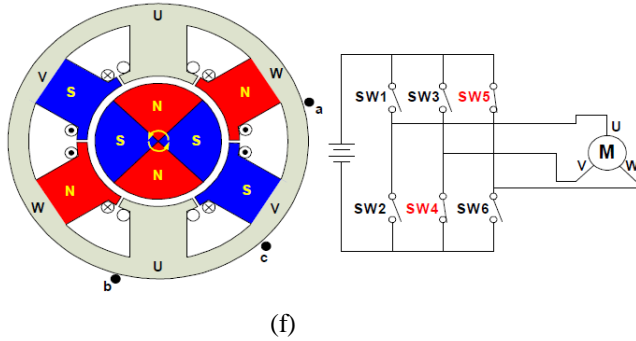
(c)



(d)



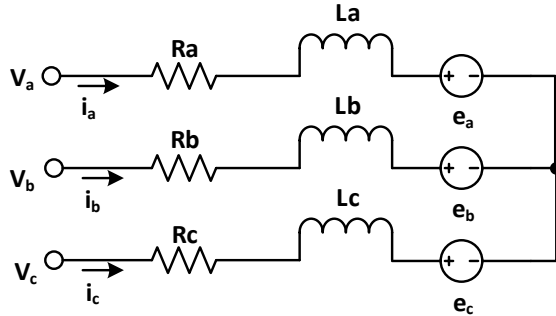
(e)



Gambar 2.3 Nilai hall sensor pada urutan komutasi motor BLDC [6].
(a) 001, (b) 101, (c) 100, (d) 110, (e) 010, (f) 011.

2.1.2 Rangkaian Pengganti Motor BLDC

Rangkaian pengganti motor BLDC dengan konfigurasi bintang dapat dimodelkan sesuai gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian pengganti motor BLDC

Tegangan tiap fasa pada kumparan stator dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (2.2)$$

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (2.3)$$

$$V_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (2.4)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (2.5)$$

di mana V_{ab} - V_{bc} - V_{ca} adalah tegangan tiap fasa, R adalah resistansi stator, i_a - i_b - i_c adalah arus yang masuk ke masing-masing kumparan stator, L adalah induktansi stator, e_a - e_b - e_c adalah sumber *back* EMF. T_e dan T_L adalah torsi elektrik dan torsi beban, J adalah inersia rotor, k_f adalah konstanta gesekan, dan ω_m adalah kecepatan rotor. Sedangkan *back-emf* dan torsi yang dihasilkan dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$e_a = \frac{k_e}{2} F(\theta_e) \omega_m \quad (2.6)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_m \quad (2.7)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} F\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_m \quad (2.8)$$

$$T_e = \frac{k_t}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.9)$$

di mana,

k_e = konstanta *back-emf* tiap fasa (V/rad.s⁻¹) ;

k_t = konstanta torsi (Nm.A);

θ_e = posisi elektrik rotor (° elektrik);

ω = kecepatan rotor (rad/s);

$F(\theta)$ = fungsi gelombang *back* EMF.

Posisi elektrik rotor dapat dicari dengan mengalikan posisi mekanis rotor dengan jumlah pasang kutub seperti persamaan 2.10.

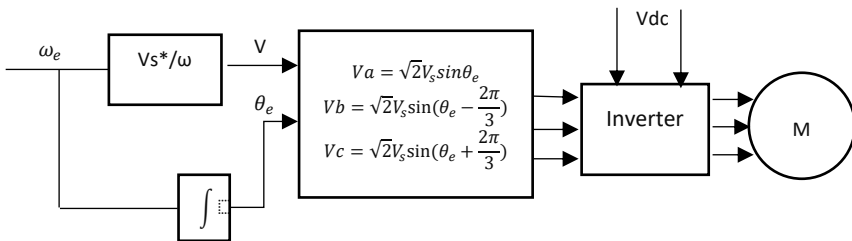
$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m \quad (2.10)$$

Fungsi $F(\cdot)$ akan memberikan bentuk *back-emf* trapezoidal. Nilai dari fungsi $F(\cdot)$ ditentukan dengan persamaan 2.10. [7]

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{2\pi}{3}), & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1, & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{5\pi}{3}), & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (2.11)$$

2.2 Kontrol Kecepatan Skalar

Metode paling sederhana untuk mengontrol *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) adalah dengan kontrol skalar. Prinsip kerja kontrol skalar adalah menjaga rasio antara tegangan dan frekuensi pada nilai yang konstan. Dalam rangka menjaga nilai rasio yang konstan, nilai referensi frekuensi ditentukan terlebih dahulu sedangkan besar tegangan disesuaikan. Pada umumnya, metode kontrol skalar menggunakan sistem *open loop* sehingga tidak memiliki umpan balik, lebih mudah, dan murah untuk diaplikasikan. Kontrol kecepatan skalar pada PMSM ditunjukkan pada gambar 2.5[8] .

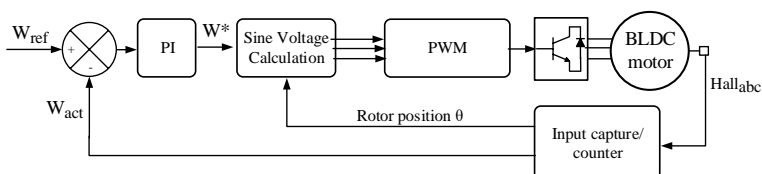


Gambar 2.5 Blok diagram V/f kontrol [8]

Metode skalar sering diaplikasikan pada motor induksi sangkar baging. Metode ini juga dapat diaplikasikan pada PMSM dengan prinsip menjaga fluks stator pada nilai *rating*-nya. Hal ini dimaksudkan agar motor dapat menghasilkan torsi yang diinginkan. Pengaplikasian metode skalar pada PMSM menggunakan sinusoidal PWM (SPWM). Sedangkan kecepatan sudut rotor dapat diperoleh melalui frekuensi tegangan suplai [8].

Pada BLDC, metode ini menggunakan konsep dengan mengubah tegangan masukan pada BLDC maka akan didapatkan kecepatan yang bervariasi, di mana tegangan referensi berasal dari kecepatan referensi. Salah satu metode untuk memvariasikan tegangan adalah menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*). PWM bekerja dengan membandingkan sinyal referensi dan sinyal *carrier*. Hasil perbandingan tersebut, berupa pulsa-pulsa dengan lebar yang bervariasi. Dengan mengatur lebar pulsa PWM, tegangan yang disuplai ke motor dapat ditentukan. Hal ini disebabkan karena pulsa PWM digunakan sebagai pemicu sakelar untuk menyala dan mati. [7]

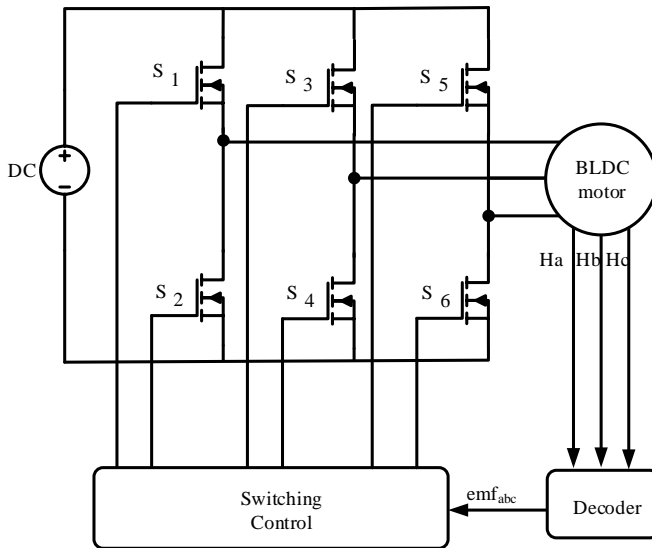
Pada BLDC, terdapat dua metode kontrol kecepatan skalar, yaitu *open loop* dan *close loop*. Metode *open loop* memiliki dua keunggulan yaitu tidak memiliki umpan balik, lebih mudah, dan murah untuk diaplikasikan. Namun, metode ini juga memiliki kekurangan, yaitu tanpa umpan balik, kita tidak tahu pada kecepatan berapa motor berjalan. Karena jika beban yang diberikan bervariasi, maka kecepatan motor akan bervariasi juga. Untuk itu digunakanlah metode kontrol kecepatan skalar *close loop*, seperti pada gambar 2.6. [9]



Gambar 2.6 Kontrol kecepatan skalar *close loop* pada motor BLDC [9]

2.3 Inverter Tiga Fasa dengan Enam Switch

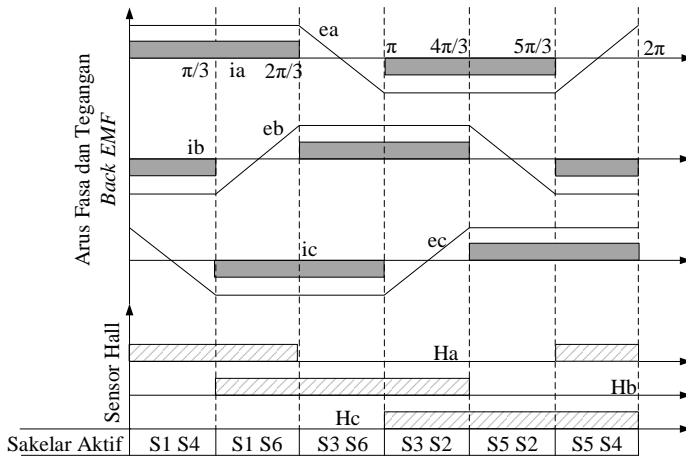
Kontrol kecepatan konvensional pada motor BLDC pada umumnya menggunakan *six-switch three phase inverter* (SSTPI) dan tiga sensor Hall. Inverter dengan enam saklar digunakan untuk membuat tegangan suplai motor yang mulanya adalah tegangan DC menjadi tegangan AC. Topologi inverter tiga fasa dengan enam *Switch* ditunjukkan oleh gambar 2.7.



Gambar 2.7 Topologi SSTPI (*Six Switch Three Phase Inverter*) [10]

Pada gambar 2.7 ditunjukkan bahwa inverter tiga fasa memiliki enam *switch* dengan komposisi S_1, S_3, S_5 untuk fase positif sedangkan S_2, S_4, S_6 untuk fase negatif. *Switch* dengan posisi vertikal satu sama lain, dalam hal ini *switch* S_1 - S_2 , S_3 - S_4 , dan S_5 - S_6 , tidak boleh terkonduksi secara bersamaan, karena akan menyebabkan hubung singkat pada sumber DC dan menghasilkan keluaran tegangan AC yang tidak sesuai.

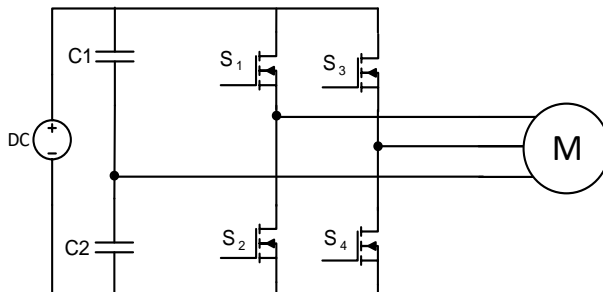
Bentuk tegangan *back emf*, arus fasa, sensor hall, dan strategi penyakelaran pada motor BLDC dengan SSTPI ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bentuk gelombang arus fasa dan tegangan *back-emf*, sensor hall, dan strategi penyakelaran pada SSTPI [7]

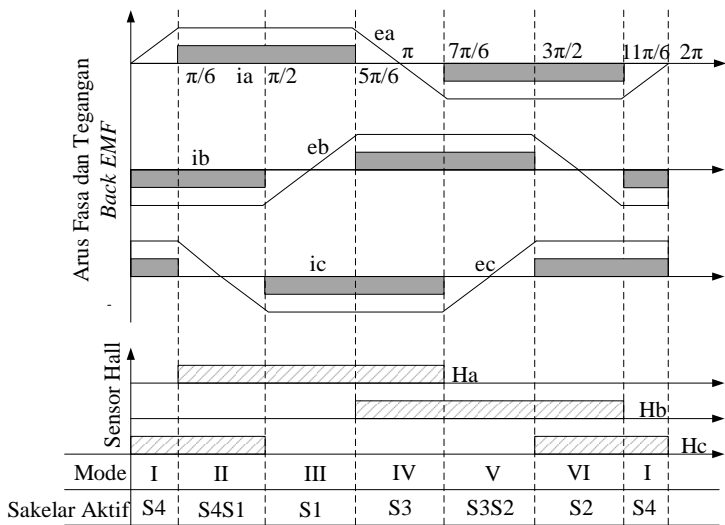
2.4 Inverter Tiga Fasa dengan Empat Switch

Pada saat ini, sedang dilakukan banyak penelitian untuk mengurangi harga kontroler motor BLDC, salah satunya adalah dengan mengurangi komponen kontroler seperti sensor dan *switch*. Untuk itu dikembangkanlah topologi *Four Switch Three Phase Inverter* (FSTPI) dengan fokus utama untuk mengurangi suplai daya, rugi-rugi daya, dimensi komponen, dan harga. [5]



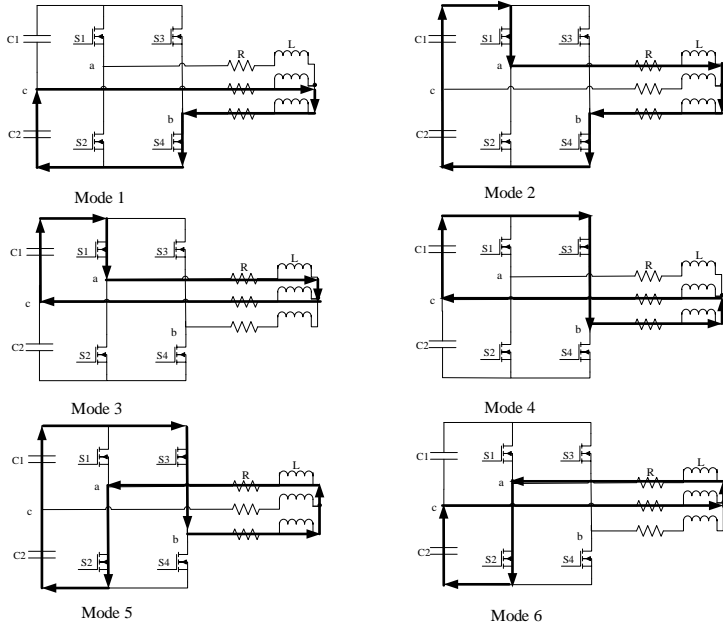
Gambar 2.9 Topologi FSTPI (*Four Switch Three Phase Inverter*) [10]

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9, sistem FSTPI terdiri atas empat saklar (S1, S2, S3, S4) dan dua buah kapasitor pada satu lengan. Fasa A dan B pada motor dihubungkan ke lengan sakelar, sedangkan fasa C dihubungkan ke titik tengah kapasitor pembagi tegangan yang tidak terkontrol. Karena topologi dari FSTPI berbeda dengan SSTPI, maka dibutuhkan metode komutasi baru untuk menghasilkan performa yang optimal. Enam mode komutasi dibentuk dari sinyal Hall yang didapat berdasarkan posisi rotor. Urutan komutasi dengan topologi FSTPI ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Bentuk gelombang arus fasa dan tegangan *back-emf*, sensor hall, dan strategi penyakelaran pada FSTPI [10]

Visualisasi rangkaian pada setiap mode FSTPI ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Rangkaian pengganti FSTPI pada setiap mode [11]

Dari rangkaian tersebut dapat diturunkan persamaan tegangan fasa pada motor sebagai berikut

$$V_{ab} = V_{c1} + V_{c2} = 2Ri_a + 2L \frac{di_a}{dt} + e_a - e_b \quad (2.12)$$

$$V_{bc} = V_{c1} = 2Ri_b + 2L \frac{di_b}{dt} + e_b - e_c \quad (2.13)$$

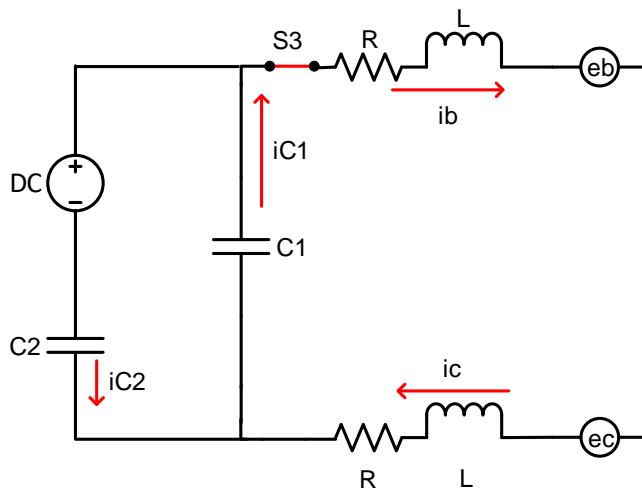
$$V_{ca} = V_{c2} = 2Ri_c + 2L \frac{di_c}{dt} + e_c - e_a \quad (2.14)$$

Berdasarkan gambar 2.11, dapat disimpulkan bahwa terdapat dua mode yang membutuhkan dua sakelar untuk memutus dan menghubungkan rangkaian dan empat mode yang hanya membutuhkan satu sakelar untuk memutus dan menghubungkan rangkaian. Pada mode 2 dan mode 5, tegangan

yang disuplai ke fasa motor bernilai setara dengan tegangan sumber. Sedangkan pada mode lainnya memiliki tegangan fasa yang bernilai setengah dari tegangan sumber. Tegangan yang tidak sama antarfasa ini merupakan kekurangan dari topologi FSTPI.

Selain itu, kekurangan dari metode FSTPI adalah arus pada fasa C tidak bernilai nol ketika fasa A dan B terkonduksi (mode 2 dan mode 5). Hal ini disebabkan karena digantikannya sakelar dengan kapasitor, sehingga arus di fasa C tidak terkontrol. Nilai arus fasa C ini akan menyebabkan distorsi pada arus fasa lain, karena resultan arus yang masuk ke motor harus bernilai nol [12].

Pada FSTPI untuk menentukan nilai kapasitansi kapasitor, maka perlu dilakukan analisa mode komutasi ketika *switch on* dan *switch off*. Pada mode 4, fasa yang aktif adalah fasa B dan fasa C sedangkan sakelar yang aktif adalah S3. Rangkaian pengganti mode 4 ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Rangkaian pengganti FSTPI mode 4, S3 on

Berdasarkan rangkaian tersebut dapat diamati bahwa saat S3 “on”, kapasitor C1 akan *discharge* untuk menyuplai motor. Sedangkan ketika S3 “off”, kapasitor C1 tidak mengalami *charge* ataupun *discharge*. Hal ini disebabkan karena tegangan kapasitor C1 merupakan penjumlahan tegangan antara C2 dengan sumber.

Saat S3 “on”, maka

$$-v_{c1} + 2v_R + 2v_L + e_b - e_c = 0 \quad (2.15)$$

dengan v_{c1} merupakan tegangan kapasitor 1, v_R dan v_L adalah tegangan pada resistor dan induktor stator.

Karena $v_{c1} = V_{dc} - v_{c2}$ maka,

$$i_{c1} = -i_{c2} \quad (2.16)$$

$$i_c = i_{c1} - i_{c2} \quad (2.17)$$

Sehingga,

$$i_c = i_{c1} + i_{c1} \quad (2.18)$$

$$i_{c1} = \frac{i_c}{2} \quad (2.19)$$

$$i_{c2} = -\frac{i_c}{2} \quad (2.20)$$

Tegangan kapasitor dapat dituliskan sebagai berikut,

$$V_{dc} = v_{c1} + v_{c2} \quad (2.21)$$

Karena kedua kapasitor memiliki nilai yang sama maka,

$$v_{c1} = v_{c2} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.22)$$

Kondisi yang sama, terjadi pada mode 3, di mana kapasitor C1 mengalami *discharging*. Sedangkan pada mode 6 dan 1, kapasitor C2 mengalami *discharging*. Dari analisis yang telah dilakukan pada keempat mode dapat disimpulkan bahwa,

$$|i_{c1}| = |i_{c2}| = \frac{i_c}{2} \quad (2.23)$$

Fase *charge* dan *discharge* kapasitor berhubungan dengan jumlah muatan yang dapat ditampung oleh kapasitor. Jumlah muatan tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan 2.24.

$$Q = C \cdot V \quad (2.24)$$

dengan Q adalah jumlah muatan (Coloumb), C adalah kapasitansi kapasitor (F), dan V adalah tegangan kapasitor.

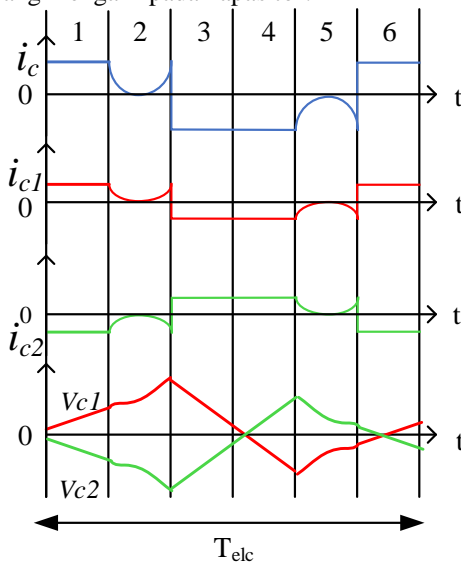
Selain menggunakan persamaan 2.24, nilai Q juga dapat ditentukan dengan persamaan 2.25

$$Q = i \cdot t \quad (2.25)$$

di mana i adalah arus yang mengalir pada rangkaian (A) dan t adalah waktu mengalirnya arus (sekon). Sedangkan jumlah muatan dalam rentang waktu tertentu, dapat dihitung menggunakan persamaan 2.26.

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt \quad (2.26)$$

Berdasarkan persamaan 2.23, dimana nilai arus kapasitor adalah setengah dari arus fasa C, maka untuk menentukan Q perlu diketahui bentuk arus yang mengalir pada kapasitor.



Gambar 2.13 Bentuk Gelombang Arus Fasa C, Arus dan Tegangan Kapasitor C1 dan Kapasitor C2

Berdasarkan bentuk tegangan kapasitor pada gambar 2.13, kedua kapasitor akan mengalami *charging* pada tiga mode dan *discharging* pada tiga mode selanjutnya secara berkebalikan. Pada mode 6-1-2, kapasitor C1 *charging* sedangkan kapasitor C2 *discharging*. Pada mode 3-4-5, kapasitor C1 *discharging* sedangkan kapasitor C2 *charging*. Untuk menentukan nilai Q , maka dihitung nilai muatan dari salah satu fase, dalam hal ini, akan dihitung nilai Q pada fase *charging* kapasitor.

Dengan memperhatikan bentuk arus kapasitor, dapat kita simpulkan bahwa fase *charging* terdiri dari dua mode dengan nilai arus kapasitor konstan dan satu mode dengan nilai arus setengah gelombang sinusoidal. Karena bentuk arus C1 dan C2 identik, maka jumlah muatan yang mengalir dalam waktu tertentu pada C1 dan C2, sama. Maka, besarnya Q ditentukan berdasarkan persamaan-persamaan berikut :

a) Komponen Konstan

$$Q_{c1} = Q_{c2} = Q_1 = i.t = I_{capacitor} \times T_{elc1} \quad (2.27)$$

dengan I kapasitor adalah nilai arus konstan kapasitor dan T_{elc1} adalah setengah dari T_{elc} .

b) Komponen Sinusoidal

$$Q_{c1} = Q_{c2} = Q_2 = \int_0^{T_{elc2}} I_{max} \sin(\omega_s t) dt \quad (2.28)$$

$$Q_2 = \frac{I_{max}}{\omega} (-\cos(\omega(T_{elc2})) - (-\cos \omega(0))) \quad (2.29)$$

dengan I_{max} adalah nilai puncak dari arus kapasitor berbentuk sinus, T_{elc2} adalah periode satu mode, ωt adalah fungsi posisi dari gelombang sinus.

$$T_{elc2} = \frac{T_{elc}}{6} \quad (2.30)$$

$$\omega = 2\pi \frac{3}{T_{elc}} = \frac{6\pi}{T_{elc}} \quad (2.31)$$

$$Q_2 = \frac{I_{max} T_{elc}}{6\pi} (-\cos(\pi) - (-\cos(0))) \quad (2.32)$$

$$Q_2 = \frac{2 I_{max} T_{elc}}{6\pi} = \frac{I_{max} T_{elc}}{3\pi} \quad (2.33)$$

Nilai Q untuk masing-masing bentuk gelombang, dapat ditentukan dengan persamaan 2.35.

$$Q_{c1} = Q_{c2} = Q_1 - Q_2 \quad (2.34)$$

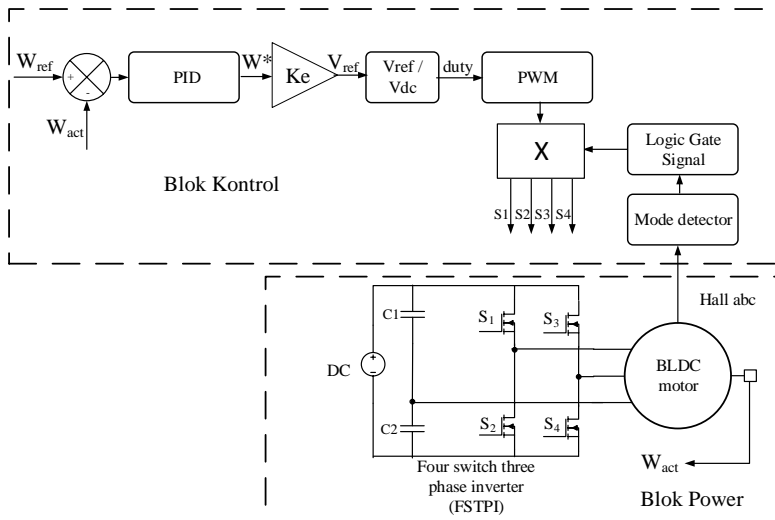
Setelah mengetahui nilai Q maka dapat ditentukan nilai *ripple* tegangan yang diinginkan, kemudian nilai kapasitor yang dibutuhkan dapat ditentukan.

BAB 3

KONTROL SKALAR KECEPATAN MOTOR BLDC MENGUNAKAN 4-SWITCH VSI

3.1 Konfigurasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor BLDC

Sistem kontrol kecepatan motor BLDC pada penelitian ini menggunakan sumber listrik searah (DC) sebagai suplai daya, *voltage source inverter* (VSI) dengan empat *switch* untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan tiga fasa, dan motor BLDC. Skema konfigurasi sistem ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Konfigurasi sistem pengaturan kecepatan motor BLDC

Sumber listrik DC yang digunakan adalah baterai 100V sedangkan kontrol kecepatan pada penelitian ini menggunakan perbandingan antara kecepatan referensi (W_{ref}) dengan kecepatan aktual (W_{act}). Hasil kontrol kecepatan ini berupa kecepatan angular referensi (W^*). W^* dikalikan dengan konstanta k_e menghasilkan tegangan referensi. Kemudian, nilai tegangan referensi yang didapat dibagi dengan

nilai V_{dc} sehingga mendapatkan nilai *duty cycle*. *Duty cycle* diolah oleh PWM menjadi pulsa-pulsa yang kemudian dikalikan dengan sinyal keluaran sensor *hall-effect*. Hasil perkalian tersebut merupakan pulsa-pulsa *switching* sebagai urutan pensaklaran mosfet.

Penelitian ini menggunakan motor BLDC sebagai obyek, khususnya motor BLDC milik Tim Gesits. Spesifikasi motor BLDC yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter motor BLDC

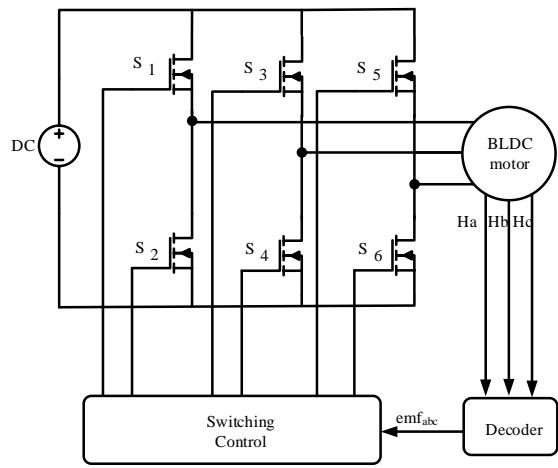
Parameter	Nilai
<i>No. of Poles (pairs)</i>	4
<i>Rated DC Bus Voltage (V_{dc})</i>	100 V
<i>Rated Speed (ω_r)</i>	5000 rpm
<i>Rated Current (A)</i>	61,4 A
<i>Rated Torque (T_{rated})</i>	11,1 Nm
<i>Rated Power (P_{rated})</i>	5 kW
<i>Voltage Constant (k_e)</i>	18,935 V/krpm
<i>Torque Constant (k_t)</i>	0.180815 Nm/A
<i>Resistance per phase (R_{ph})</i>	0.04335 Ω
<i>Inductance per phase (L_{ph})</i>	105,2665 μ H
<i>Moment of Inertia (J)</i>	0,059009 kg.m ²

3.2 Pemodelan Kontrol VSI Berbasis Sensor Hall-Effect

Motor BLDC membutuhkan informasi posisi rotor untuk menjaga kontinuitas putarannya. Informasi tentang posisi rotor dapat diperoleh dengan memasang tiga buah sensor hall. Sensor hall bertugas untuk mendeteksi sinyal magnet yang dihasilkan rotor ketika melewati sensor tersebut. Keluaran sensor hall akan diproses oleh decoder sehingga menghasilkan nilai 1, 0 dan -1. Nilai 1 menunjukkan kutub magnet utara pada rotor dekat dengan sensor, nilai 0 menunjukkan kutub magnet tidak terdeteksi oleh sensor, dan -1 menunjukkan ketika terdeteksi kutub magnet selatan pada rotor dekat dengan sensor.

Enam switch pada VSI bekerja berdasarkan hasil sinyal pendeteksian sensor *hall-effect*. Setiap sensor bertugas untuk mendapatkan posisi motor yang presisi. Sinyal sensor *hall-effect* akan

diubah menjadi *switching control* yang bernilai 1 dan 0 yang merepresentasikan *switch* ON dan OFF. *Switching control* yang didapatkan sudah memenuhi aturan bahwa dua *switch* pada satu lengan tidak dapat bekerja secara bersamaan karena dapat menimbulkan hubungan singkat. Skema sistem kontrol motor menggunakan VSI berbasis sensor *hall-effect* ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema sistem kontrol motor menggunakan VSI berbasis sensor *Hall-effect*

Urutan komutasi pada VSI berbasis sensor *hall-effect* ditunjukkan pada tabel 3.2.

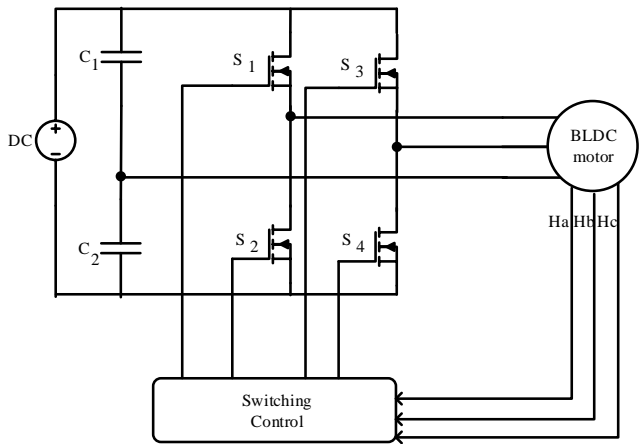
Tabel 3.2 Urutan komutasi pada VSI enam *switch* berbasis sensor *hall-effect*

Sinyal Hall			Mode Saklar					
H1	H2	H3	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0

Tabel 3.2 Urutan komutasi pada VSI enam switch berbasis sensor *hall-effect* (lanjutan)

Sinyal Hall			Mode Saklar					
H1	H2	H3	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0	1	1	0	0	1	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0
1	1	0	0	1	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

Pada penelitian ini digunakan VSI dengan empat *switch*, sehingga dibutuhkan mekanisme komutasi yang berbeda dengan kontrol konvensional. Inverter empat *switch* terdiri dari empat sakelar dan dua buah kapasitor. Skema sistem kontrol VSI berbasis sinyal *hall-effect* ditunjukkan pada gambar 3.3.



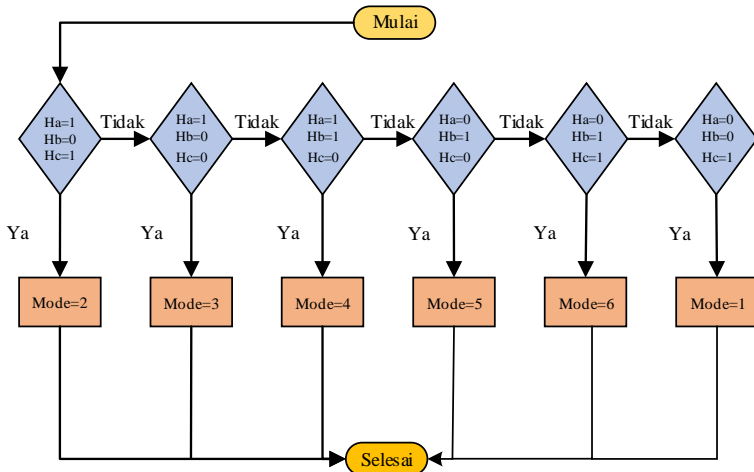
Gambar 3.3 Skema sistem kontrol motor menggunakan VSI berbasis sensor *Hall-effect*

Urutan komutasi pada VSI berbasis sensor *hall-effect* ditunjukkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Urutan komutasi pada VSI empat *switch* berbasis sensor *hall-effect*

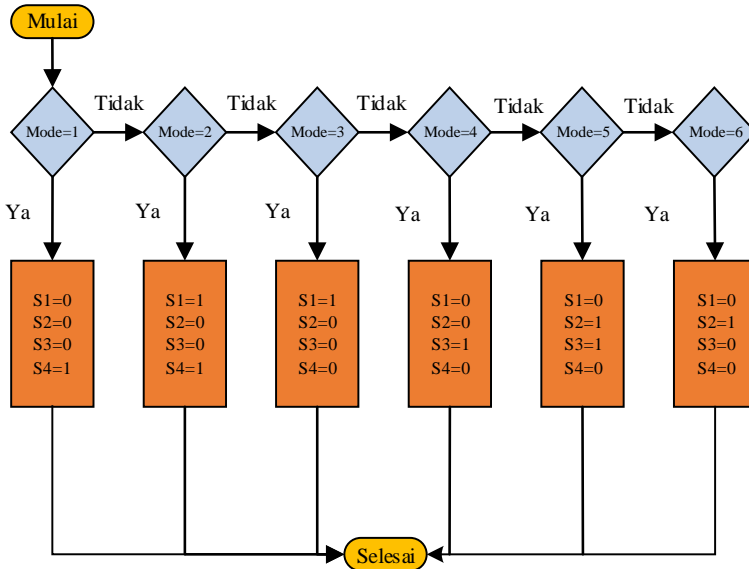
Sinyal Hall			Mode Sakelar			
H1	H2	H3	S1	S2	S3	S4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1	1
0	1	1	0	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0

Komutasi bisa terjadi secara kontinyu karena adanya sensor yang membaca posisi rotor. Posisi rotor ini kemudian diterjemahkan menjadi mode-mode pada FSTPI. Diagram alir proses perubahan informasi posisi rotor dengan mode-mode FSTPI, ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir penerjemahan posisi rotor menjadi mode FSTPI

Setelah informasi dalam bentuk mode didapatkan, maka yang diperlukan selanjutnya adalah menerjemahkan mode menjadi sakelar mana yang harus diaktifkan dan mana yang tidak. Diagram alir penerjemahan mode menjadi strategi penyakelaran ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram alir penerjemahan mode menjadi strategi penyakelaran FSTPI

3.3 Penentuan Nilai Kapasitor

Untuk memilih kapasitor yang digunakan, hal yang perlu diperhatikan adalah spesifikasi motor BLDC. Motor BLDC yang digunakan memiliki rating kecepatan 5000 rpm dan rating arus 61,4 A. Berdasarkan persamaan 2.24., nilai kapasitor dapat dihitung dengan menentukan nilai ripple tegangan yang diinginkan. Desain FSTPI yang digunakan memiliki ripple tegangan maksimum 2% dan diasumsikan bekerja pada beban dan kecepatan rating 5000 rpm. Arus yang mengalir pada kapasitor dapat ditentukan dengan persamaan 2.23, yaitu

$$I_{c1} = I_{c2} = I_{cap} = \frac{i_c}{2} = 30.7 \text{ A}$$

$$T_{mec} = \frac{1}{RPS} = \frac{60}{5000} = 0,012 \text{ s}$$

$$T_{elc} = \frac{T_{mec}}{P} = \frac{0,012}{4} = 0,003 \text{ s}$$

$$T_{elc1} = \frac{0,003}{2} = 0,0015 \text{ s}$$

Dengan mendapatkan nilai I, maka dapat ditentukan nilai Q dengan persamaan 2.27, 2.33, dan 2.34.

$$Q_1 = I_{cap} \times T_{elc1} = 30,7 \times 0,0015 = 0,04605 \text{ Coulomb}$$

$$Q_2 = \frac{I_{max} T_{elc}}{3\pi} = \frac{30,7 \times 0,003}{3\pi} = 0,009772114 \text{ Coulomb}$$

$$Q_{C1} = Q_{C2} = Q = Q_1 - Q_2 = 0,03627789 \text{ Coulomb}$$

Setelah mengetahui nilai Q, kemudian ditentukan nilai *ripple* tegangan maksimum yang diinginkan, yaitu 2% dari Vcap. Berdasarkan persamaan 2.22, nilai Vcap adalah

$$V_{cap} = \frac{V_{dc}}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ volt}$$

Untuk mendapatkan nilai kapasitor yang dibutuhkan, sesuai dengan persamaan 2.24, maka

$$Q = CV$$

$$Q = C \cdot \Delta V$$

$$C1 = C2 = C = \frac{Q}{\Delta V_C} = \frac{0,03627789}{0,02 \times 50} = 0,036 \text{ F} = 36 \text{ mF}$$

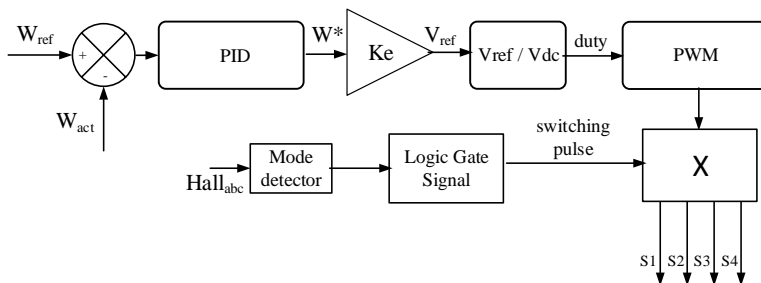
Dengan memperhitungkan kapasitor yang ada di pasaran, dipilih kapasitor 33 mF sehingga nilai *ripple* tegangan maksimum menjadi,

$$\Delta V_C = \frac{Q}{C} = \frac{0,03627789}{0,033} = 1,1 \text{ volt}$$

Nilai ripple tersebut masih di bawah 5% Vcap sehingga masih dapat ditoleransi.

3.4 Perancangan Kontrol Kecepatan

Pensaklaran VSI menggunakan sensor *hall-effect* menghasilkan kecepatan yang tidak terkontrol. Karena, seperti yang ditunjukkan tabel 3.3, terdapat dua mode yang membutuhkan dua sakelar untuk memutus dan menghubungkan rangkaian dan empat mode yang hanya membutuhkan satu sakelar untuk memutus dan menghubungkan rangkaian. Perbedaan jumlah sakelar untuk memutus dan menghubungkan rangkaian akan menyebabkan perbedaan tegangan fasa. Untuk itu diperlukan kontrol tambahan berupa kontrol kecepatan. Skema kontrol kecepatan ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Skema kontrol kecepatan

Pengaturan kecepatan motor dapat dicapai dengan menggunakan rangkaian *close loop*. Umpan balik yang digunakan adalah kecepatan aktual (W_{act}) yang kemudian dibandingkan dengan kecepatan referensi (W_{ref}). Hasil perbandingan ini berupa *error* yang akan diproses oleh kontrol kecepatan dan menghasilkan kecepatan angular referensi (W^*). Kecepatan angular referensi dikalikan dengan konstanta k_e menghasilkan tegangan referensi. Kontrol kecepatan yang digunakan pada penelitian ini adalah kontroler PID. Pada *software* MATLAB, parameter yang harus ditentukan adalah parameter proporsional, integral, dan diferensial. Parameter nilai tersebut didapatkan melalui metode *trial and error*, dengan hasil parameter $P = 1000$, $I = 5$, dan $D = 1$.

Tegangan referensi yang didapat kemudian dibagi dengan tegangan DC menghasilkan *duty cycle*. Selanjutnya, *duty cycle* akan menjadi masukan PWM generator. Pada PWM generator, *duty cycle* akan

dibandingkan dengan sinyal segitiga, dengan frekuensi *switching* sebesar 20kHz. Keluaran dari PWM generator adalah pulse yang kemudian dikalikan dengan *switching pulse* berbasis sensor *hall-effect*. Mode pensaklaran pada FSTPI, ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Mode pensaklaran pada VSI dengan empat sakelar [11]

Mode	Posisi Rotor	Sensor Hall	Fasa Aktif	Fasa Tidak Aktif	<i>Switch</i> aktif
1	$330^\circ < \theta < 0^\circ$ $0^\circ < \theta < 30^\circ$	001	Fasa B dan C	Fasa A	S4
2	$30^\circ < \theta < 90^\circ$	101	Fasa A dan B	Fasa C	S1 dan S4
3	$90^\circ < \theta < 150^\circ$	100	Fasa A dan C	Fasa B	S1
4	$150^\circ < \theta < 210^\circ$	110	Fasa B dan C	Fasa A	S3
5	$210^\circ < \theta < 270^\circ$	010	Fasa A dan B	Fasa C	S2 dan S3
6	$270^\circ < \theta < 330^\circ$	011	Fasa A dan C	Fasa B	S2

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

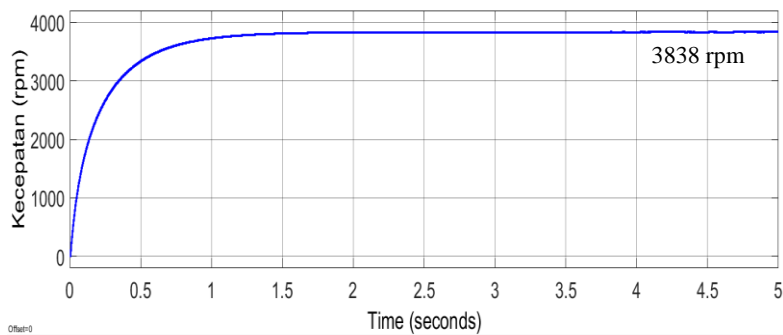
Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah berupa simulasi permodelan. Kemudian, data hasil simulasi tersebut dianalisis untuk mendapatkan acuan pengembangan sistem pengaturan pada kendaraan listrik.

4.1 Simulasi Sistem *Open Loop* Motor BLDC

Sebelum melakukan simulasi pengaturan kecepatan motor BLDC, harus dilakukan uji *open loop*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui perbedaan performa sistem sebelum dan sesudah dikontrol. Uji *open loop* dilakukan dengan cara menyuplai motor dengan tegangan *rating*, kemudian melihat karakteristik motor. Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan antara sistem *open loop* motor BLDC dengan inverter enam *switch* dan dengan inverter empat *switch*.

4.1.1 Motor BLDC dengan *Six Switch Three Phase Inverter* (SSTPI)

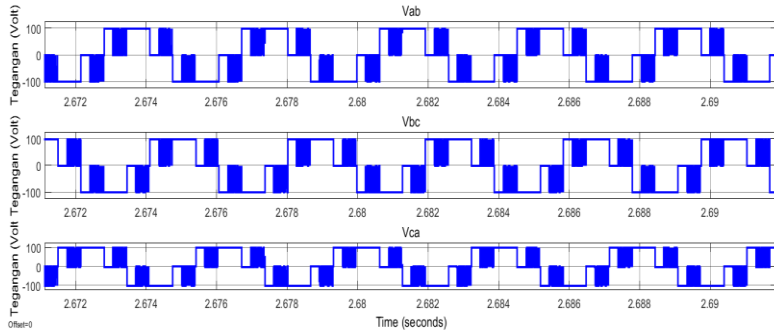
Hasil simulasi *open loop* pada motor BLDC dengan SSTPI ditunjukkan pada gambar 4.1-4.3



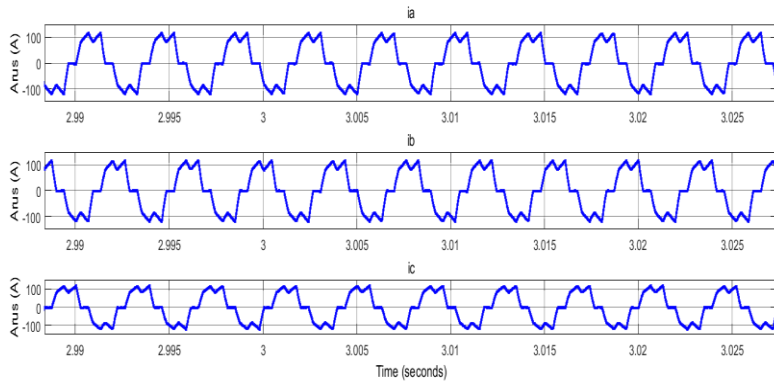
Gambar 4.1 Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem *open loop*

Dengan memberikan input torsi sebesar 11,1 Nm, didapatkan respon kecepatan seperti pada gambar 4.1. Kecepatan *steady state* mencapai 3838 rpm dengan rise time sebesar 628,822 ms.

Berdasarkan hasil simulasi, bentuk tegangan motor *brushless* DC memiliki perbedaan 120° tiap fasanya. Nilai puncak tegangan *line to line* adalah 100V. Sedangkan, bentuk arus tiap fasa berupa gelombang kotak AC dengan dua puncak seperti gelombang gigi gergaji. Bentuk arus fasa juga memiliki perbedaan 120° tiap fasanya. Bentuk gelombang tegangan *line to line* dan arus stator ditunjukkan pada gambar 4.2-4.3.



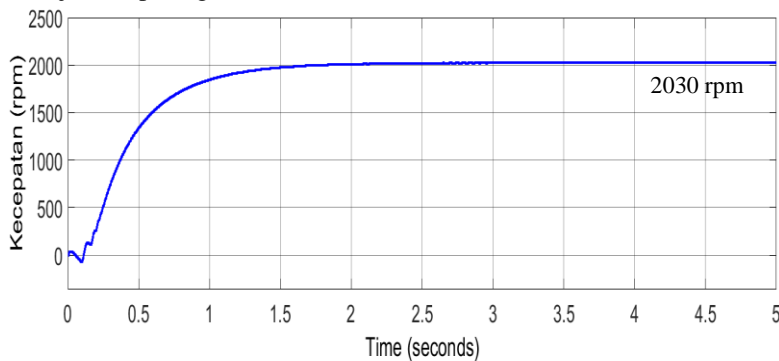
Gambar 4.2 Tegangan *line to line* motor BLDC dengan SSTPI



Gambar 4.3 Arus stator tiap fasa motor BLDC dengan SSTPI

4.1.2 Motor BLDC dengan *Four Switch Three Phase Inverter* (FSTPI)

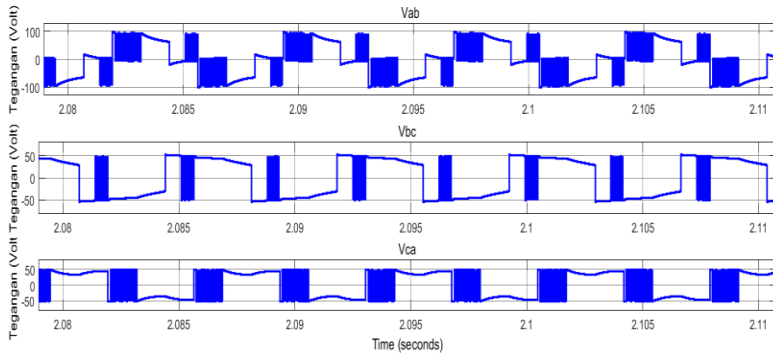
Hasil simulasi *open loop* pada motor BLDC dengan FSTPI ditunjukkan pada gambar 4.4-4.6.



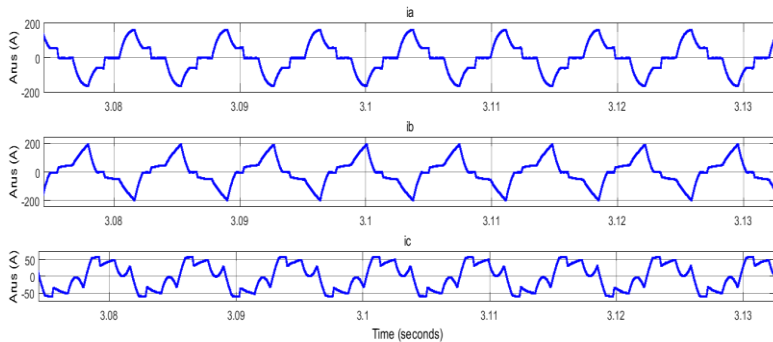
Gambar 4.4 Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI

Dengan memberikan input torsi sebesar 11,1 Nm, didapatkan respon kecepatan *steady state* mencapai 2030 rpm dengan rise time sebesar 751,894 ms. Kecepatan motor BLDC dengan FSTPI hanya mencapai setengah dari kecepatan motor BLDC dengan SSTPI. Hal ini disebabkan oleh bedanya besar tegangan yang masuk ke tiap fasa motor.

Tegangan *line to line* motor BLDC dengan FSTPI tidak sama antara satu dan lainnya. Terdapat *line* yang memiliki puncak tegangan *line to line* senilai setengah dari puncak tegangan *line to line* motor BLDC dengan enam *switch*. Hal ini menyebabkan besar kecepatan yang dicapai motor BLDC dengan FSTPI kurang dari kecepatan yang dicapai motor BLDC dengan SSTPI. Selain itu, bentuk arus stator pada motor BLDC dengan FSTPI tidak simetris tiap fasanya. Hal ini disebabkan oleh penggantian *switch* dengan kapasitor, yang dapat menyebabkan fasa c tidak terkontrol. Bentuk gelombang tegangan *line to line* dan arus stator ditunjukkan pada gambar 4.5-4.6.



Gambar 4.5 Tegangan *line to line* motor BLDC dengan FSTPI



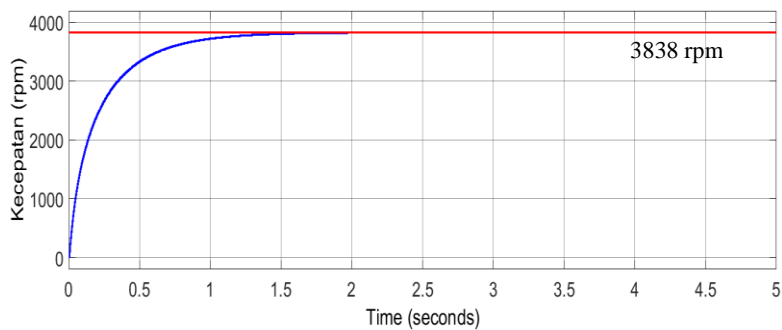
Gambar 4.6 Arus tiap fasa motor BLDC dengan FSTPI

4.2 Simulasi Sistem *Close loop* Motor BLDC

Setelah melakukan uji *open loop*, maka selanjutnya adalah pengujian sistem *close loop* untuk mengetahui performa pengaturan kecepatan yang diaplikasikan.

4.2.1 Motor BLDC dengan *Six Switch Three Phase Inverter* (SSTPI)

Hasil simulasi *close loop* pada motor BLDC dengan SSTPI ditunjukkan pada gambar 4.7.

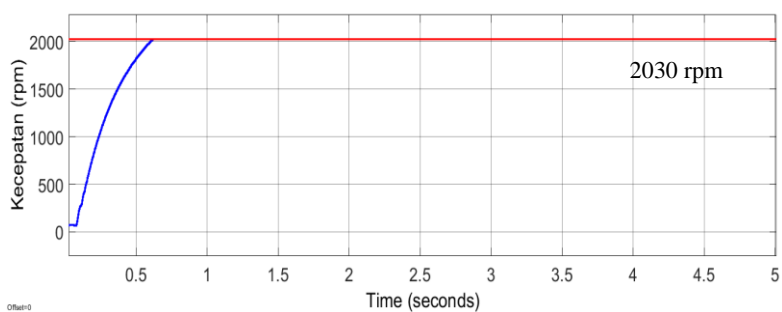


Gambar 4.7 Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop*

Dengan memberikan input torsi sebesar 11,1 Nm dan kecepatan referensi sebesar 3838 rpm , didapatkan respon kecepatan seperti pada gambar 4.7. Kecepatan *steady state* mencapai 3838 rpm dengan rise time sebesar 628,251 ms. Bentuk tegangan dan bentuk arus rangkaian *close loop* sama dengan bentuk tegangan dan arus rangkaian *open loop*.

4.2.2 Motor BLDC dengan *Four Switch Three Phase Inverter* (FSTPI)

Hasil simulasi *close loop* pada motor BLDC dengan FSTPI ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop*

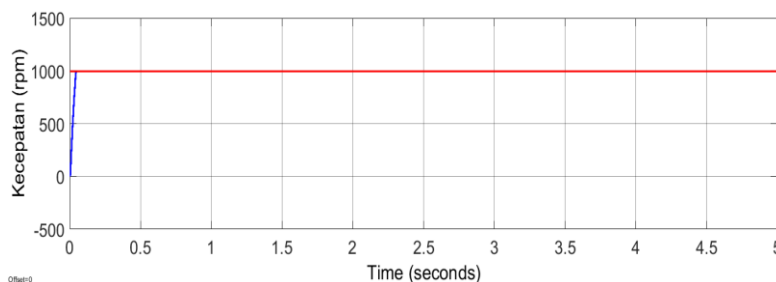
Dengan memberikan input torsi sebesar 11,1 Nm dan kecepatan referensi sebesar 2030 rpm , didapatkan respon kecepatan seperti pada gambar 4.8. Kecepatan *steady state* mencapai 3838 rpm dengan rise time sebesar 396,764 ms. Bentuk tegangan dan bentuk arus rangkaian *close loop* sama dengan bentuk tegangan dan arus rangkaian *open loop*.

4.3 Perbandingan Sistem SSTPI dengan FSTPI

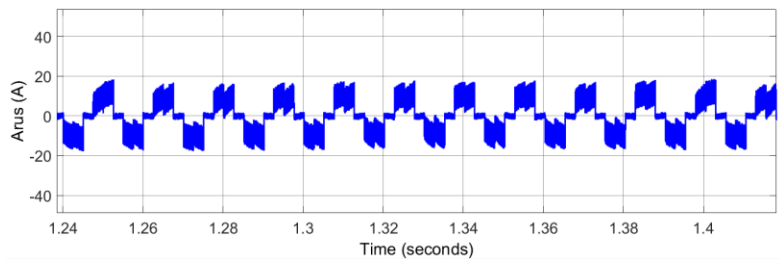
Pada bagian ini, akan dibandingkan performa sistem SSTPI dengan FSTPI. Perbandingan performa ini digunakan untuk menentukan apakah sistem FSTPI cukup baik untuk diterapkan sebagai pengganti sistem SSTPI pada motor BLDC.

4.3.1 Simulasi dengan Kecepatan Referensi Tetap dan Tanpa Beban

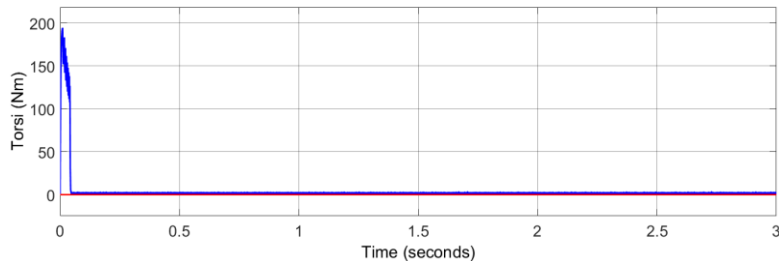
Pada kondisi kecepatan referensi tetap dan tanpa beban, akan diamati arus dan torsi pada sistem motor BLDC dengan SSTPI dan FSTPI yang akan diuji. Kecepatan diatur sebesar 1000 rpm. Hasil simulasi untuk kecepatan tetap dan tanpa beban untuk motor BLDC dengan SSTPI ditunjukkan pada gambar 4.9-4.11.



Gambar 4.9 Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* tanpa beban
(merah : kecepatan referensi; biru : kecepatan aktual)



Gambar 4.10 Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* kecepatan referensi tetap dan tanpa beban

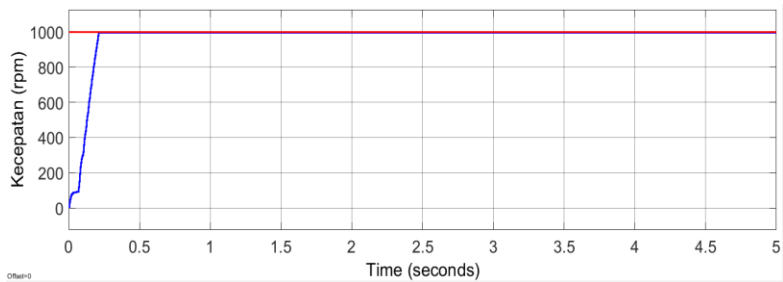


Gambar 4.11 Torsi motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* tanpa beban
(merah : torsi beban; biru : torsi elektromagnetik)

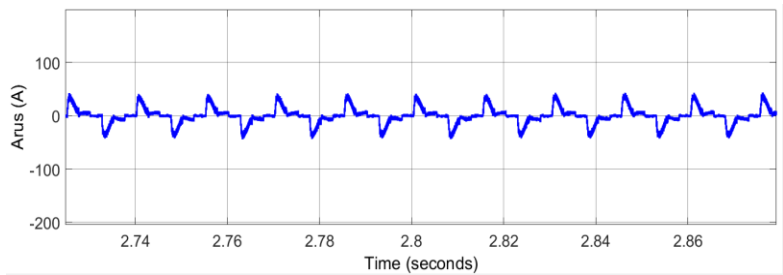
Dari gambar 4.9-4.11, didapat data *error* kecepatan pada saat *steady state* adalah sebesar 0.3%. Kecepatan motor telah mengikuti kecepatan referensinya. Sehingga, topologi SSTPI yang didesain telah mampu mengontrol kecepatan motor BLDC.

Arus puncak *steady state* mencapai 17 A dengan nilai RMS sebesar 8,7 A. Kondisi *steady state* dicapai pada saat 0,1 s dengan waktu *rise time* sebesar 31,298 ms. Torsi start yang dihasilkan 194 Nm dan *steady state* di nilai nol. Besarnya arus dan torsi start disebabkan karena tidak adanya pembatas arus dan torsi pada sistem.

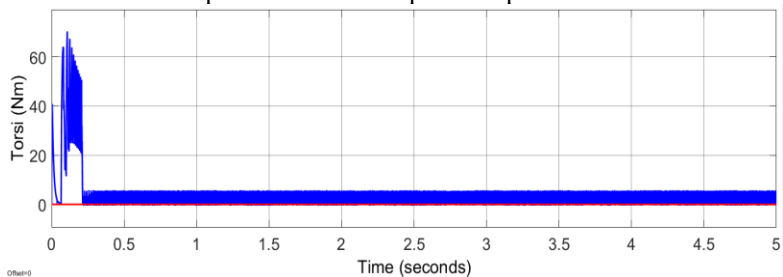
Hasil simulasi untuk kecepatan tetap dan tanpa beban untuk motor BLDC dengan FSTPI ditunjukkan pada gambar 4.12-4.14.



Gambar 4.12 Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* kecepatan referensi tetap dan tanpa beban (merah : kecepatan referensi; biru : kecepatan aktual)



Gambar 4.13 Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* kecepatan referensi tetap dan tanpa beban



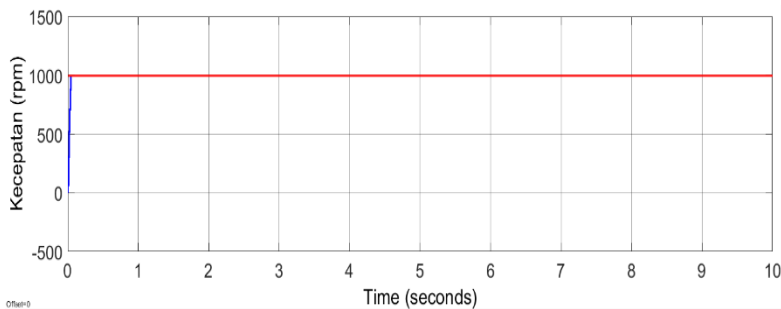
Gambar 4.14 Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* kecepatan referensi tetap dan tanpa beban

Dari gambar 4.12-4.14, didapatkan data *error* kecepatan pada saat *steady state* adalah sebesar 0.3%. Kecepatan motor telah mengikuti kecepatan referensinya. Sehingga, topologi FSTPI yang didesain telah mampu mengontrol kecepatan motor BLDC.

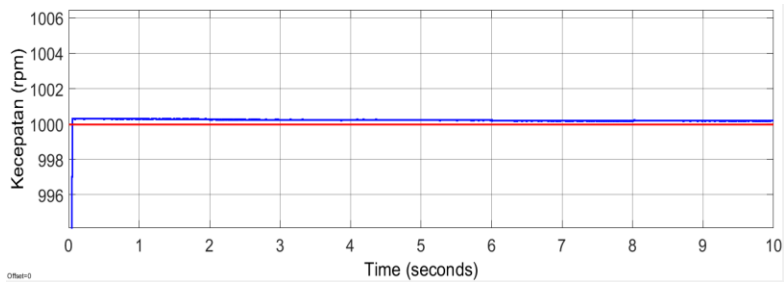
Arus puncak *steady state* mencapai 43 A dengan nilai RMS sebesar 15 A. Kondisi *steady state* dicapai pada saat 0,22 s dengan waktu *rise time* sebesar 115,34 ms. Torsi start yang dihasilkan 70,3 Nm dan *steady state* di nilai nol. Besarnya arus dan torsi start disebabkan karena tidak adanya pembatas arus dan torsi pada sistem.

4.3.2 Simulasi dengan Kecepatan Tetap Beban Berubah

Pada kondisi kecepatan referensi tetap dan beban berubah, akan diamati arus dan torsi pada sistem motor BLDC dengan SSTPI dan FSTPI yang akan diuji. Kecepatan diatur sebesar 1000 rpm. Sedangkan torsi beban yang diberikan adalah 2 Nm dari 0-2 sekon, 8 Nm dari 2-4 sekon, 6 Nm dari 4-6 sekon, 11 Nm dari 6-8 sekon, dan 7 Nm dari 8-10 sekon. Hasil simulasi untuk kecepatan tetap dan tanpa beban untuk motor BLDC dengan SSTPI ditunjukkan pada gambar 4.15-4.17.

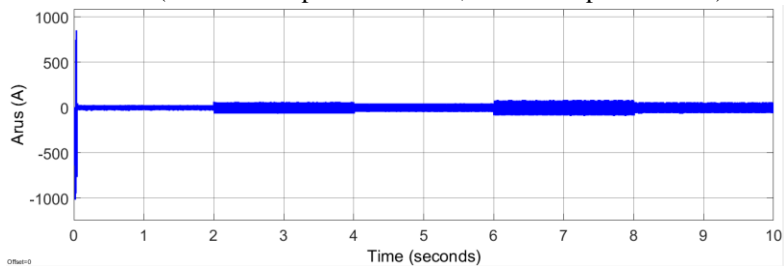


(a)

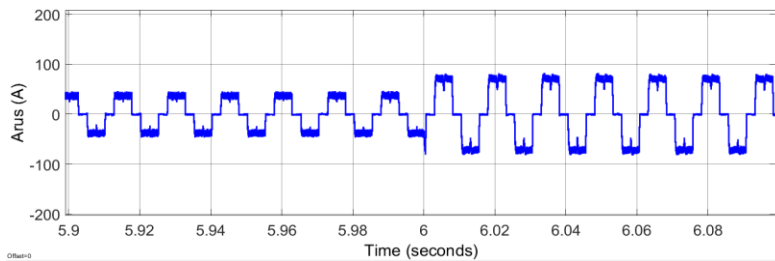


(b)

Gambar 4.15 (a) Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah, (b) Perbesaran respon kecepatan (merah : kecepatan referensi; biru : kecepatan aktual)

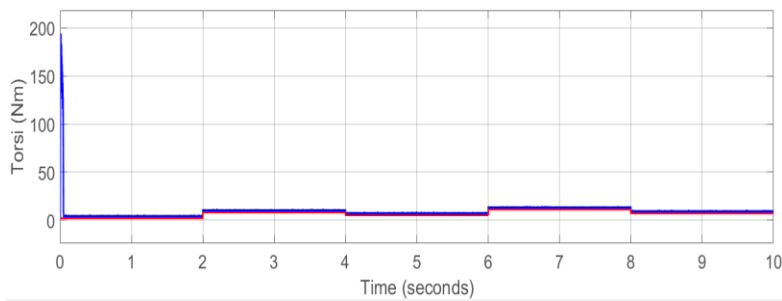


(a)

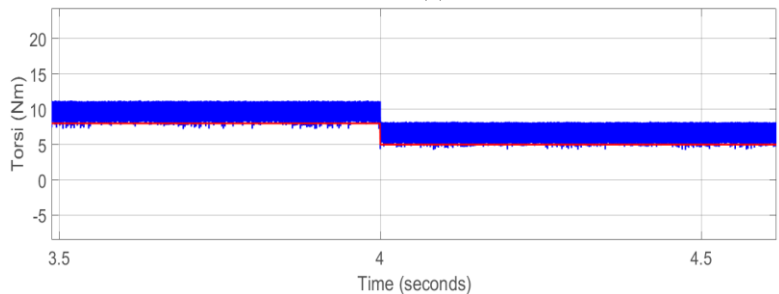


(b)

Gambar 4.16 (a) Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah (b) Arus pada rentang waktu 5,9-6,08 detik



(a)

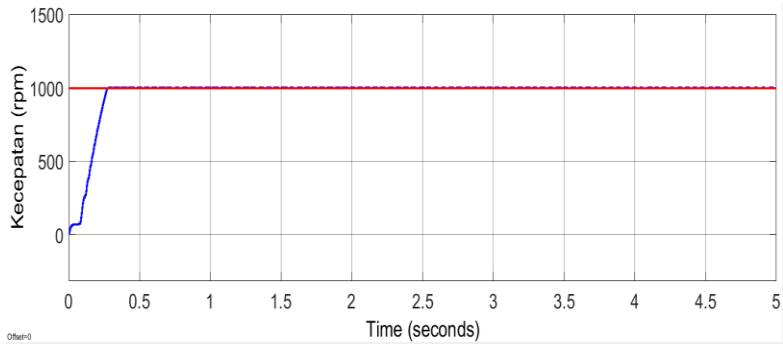


(b)

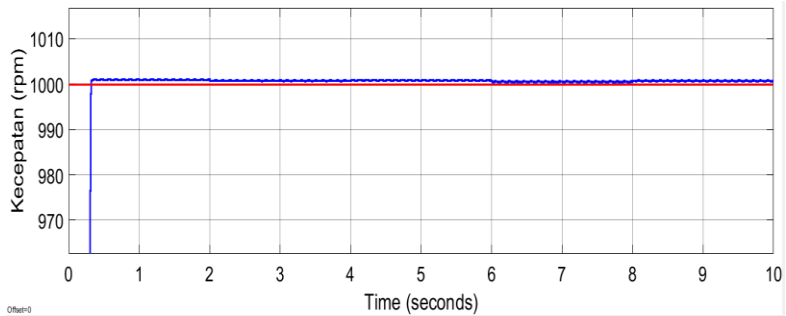
Gambar 4.17 (a) Torsi motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah, (b) Torsi pada rentang 3,5-4,5 detik (merah : torsi beban; biru : torsi elektromagnetik)

Dari gambar 4.15-4.17, didapat data bahwa *error* kecepatan pada saat *steady state* adalah sebesar 0.3%. Ketika beban naik, kecepatan motor turun, namun penurunan kecepatannya masih dalam nilai toleransi. Ketika terjadi perubahan beban, sistem dapat langsung merespon torsi dengan baik. Hal ini terlihat dari perubahan torsi elektromagnetik dan arus pada stator saat terjadi perubahan beban.

Hasil simulasi untuk kecepatan tetap dan beban berubah untuk motor BLDC dengan FSTPI ditunjukkan pada gambar 4.18-4.20.

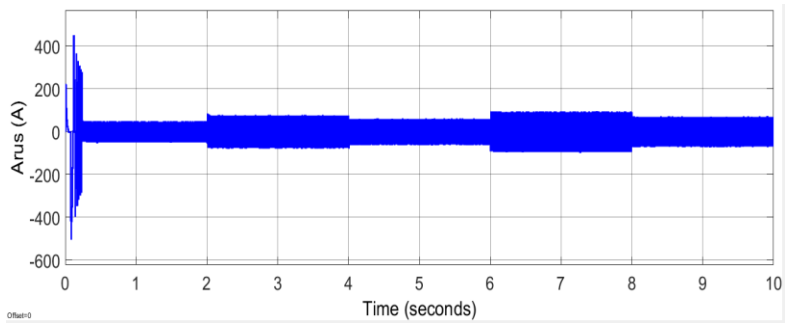


(a)

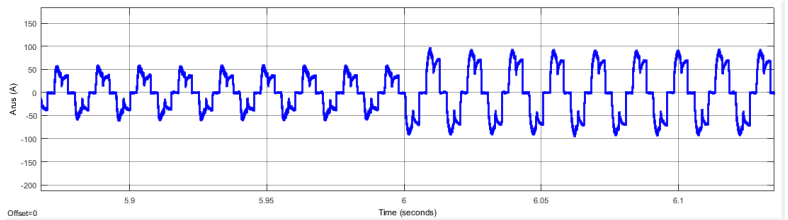


(b)

Gambar 4.18 (a) Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah, (b) Perbesaran respon kecepatan (merah : kecepatan referensi; biru : kecepatan aktual)

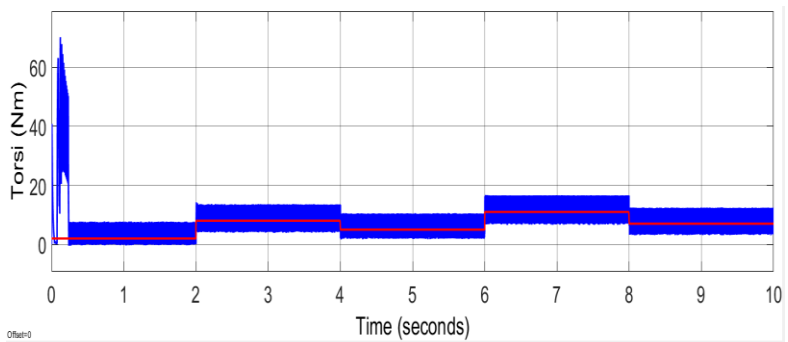


(a)

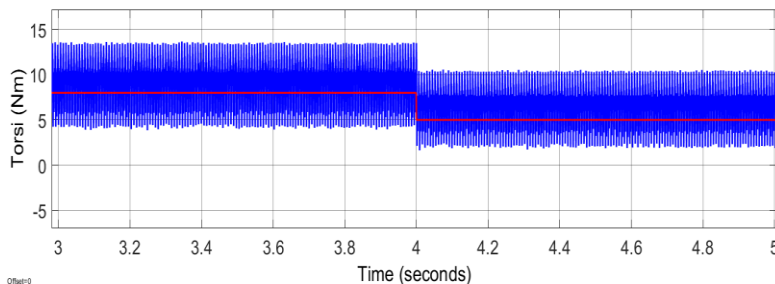


(b)

Gambar 4.19 (a) Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* kecepatan referensi tetap dan beban berubah, (b) Arus pada rentang waktu 5,9-6,1 detik



(a)



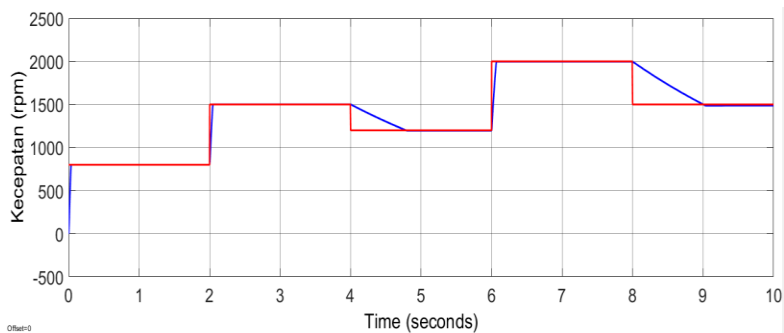
(b)

Gambar 4.20 (a) Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi tetap dan beban berubah, (b) Torsi pada rentang waktu 3-5 detik (merah : torsi beban; biru : torsi elektromagnetik)

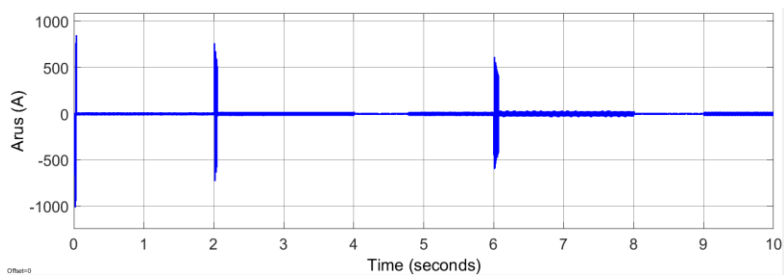
Dari gambar 4.18-4.20, dapat diperhatikan bahwa *error* kecepatan pada saat *steady state* adalah sebesar 0.3%. Ketika beban naik, kecepatan motor turun, namun penurunan kecepatannya masih dalam nilai toleransi. Ketika terjadi perubahan beban, sistem dapat langsung merespon torsi dengan baik. Hal ini terlihat dari perubahan torsi elektromagnetik dan arus pada stator saat terjadi perubahan beban.

4.3.3 Simulasi dengan Kecepatan Berubah Tanpa Beban

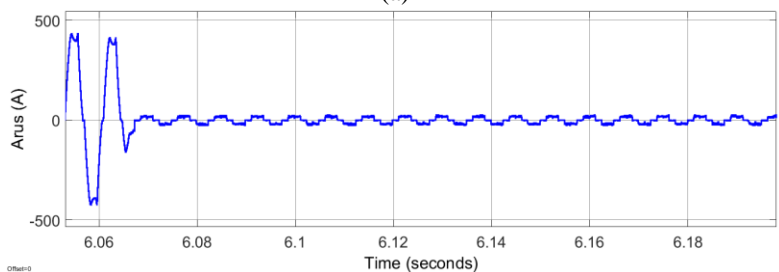
Pada kondisi kecepatan referensi berubah dan tanpa beban, akan diamati arus dan torsi pada sistem motor BLDC dengan SSTPI dan FSTPI yang akan diuji. Kecepatan referensi yang diberikan adalah 800 rpm dari 0-2 sekon, 1500 rpm dari 2-4 sekon, 1200 rpm dari 4-6 sekon, 2000 rpm dari 6-8 sekon, dan 1500 rpm dari 8-10 sekon. Hasil simulasi untuk kecepatan referensi berubah dan tanpa beban untuk motor BLDC dengan SSTPI ditunjukkan pada gambar 4.21-4.23.



Gambar 4.21 Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan referensi berubah tanpa beban (merah : kecepatan referensi; biru : kecepatan aktual)

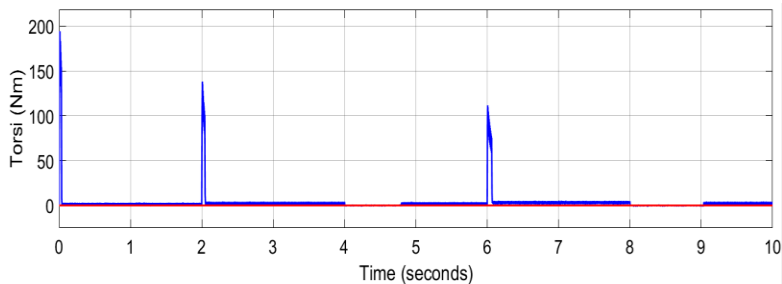


(a)



(b)

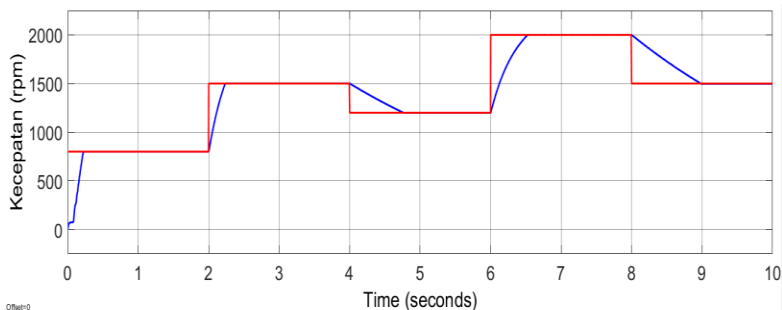
Gambar 4.22 (a) Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah dan tanpa beban
(b) Arus pada rentang 6,06-6,18 detik



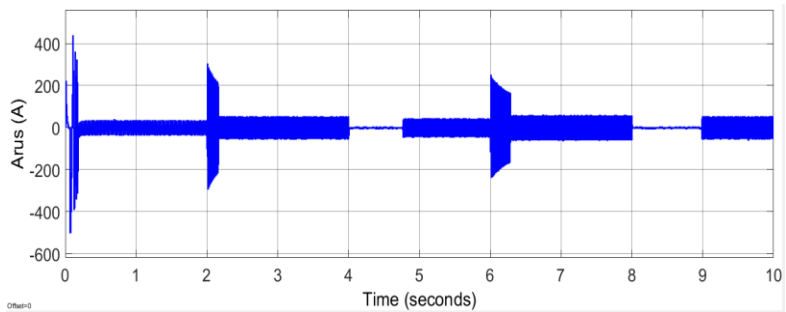
Gambar 4.23 Torsi motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah dan tanpa beban

Saat terjadi perubahan kecepatan, terjadi lonjakan arus pada stator. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadinya percepatan, diperlukan torsi yang lebih besar, sehingga V_{dc} menyuplai arus pada stator. Sedangkan ketika terjadi penurunan kecepatan torsi bernilai nol, karena pengereman regeneratif tidak disimulasikan. Sehingga arus yang tersimpan pada belitan stator dan dialirkan kembali ke sistem tidak diamati.

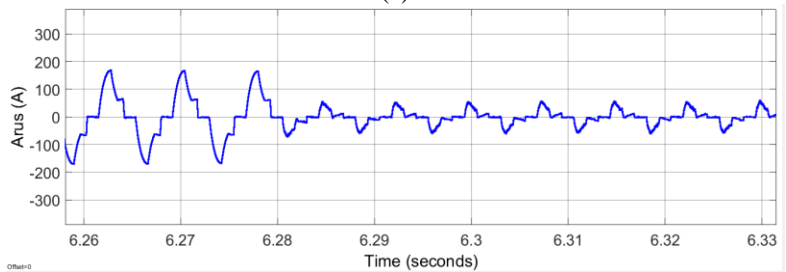
Hasil simulasi untuk kecepatan berubah dan tanpa beban untuk motor BLDC dengan FSTPI ditunjukkan pada gambar 4.24-4.26.



Gambar 4.24 Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah tanpa beban

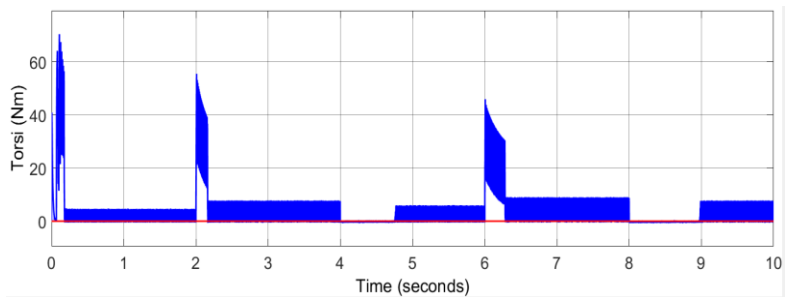


(a)



(b)

Gambar 4.25 (a) Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* kecepatan referensi berubah dan tanpa beban, (b) Arus pada rentang waktu 6,26-6,33 detik

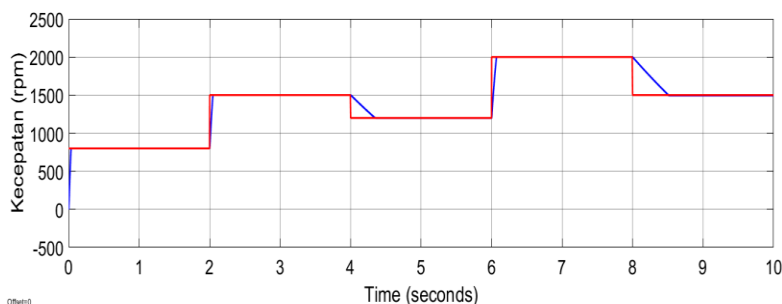


Gambar 4.26 Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah dan tanpa beban

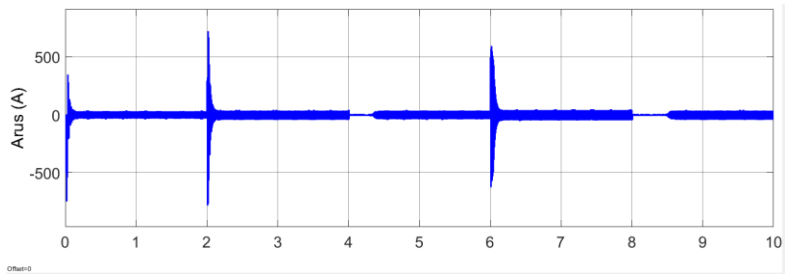
Saat terjadi perubahan kecepatan, terjadi lonjakan arus pada stator. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadinya percepatan, diperlukan torsi yang lebih besar, sehingga V_{dc} menyuplai arus pada stator. Sedangkan ketika terjadi penurunan kecepatan torsi bernilai nol, karena pengereman regeneratif tidak disimulasikan. Sehingga arus yang tersimpan pada belitan stator dan dialirkan kembali ke sistem tidak diamati.

4.3.4 Simulasi dengan Kecepatan Berubah Beban Tetap

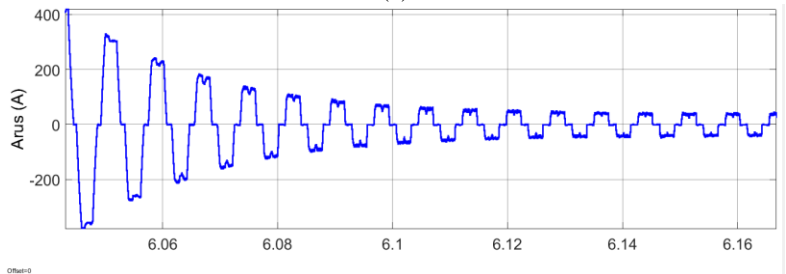
Pada kondisi kecepatan referensi berubah dan beban tetap, akan diamati arus dan torsi pada sistem motor BLDC dengan SSTPI dan FSTPI yang akan diuji. Kecepatan referensi yang diberikan adalah 800 rpm dari 0-2 sekon, 1500 rpm dari 2-4 sekon, 1200 rpm dari 4-6 sekon, 2000 rpm dari 6-8 sekon, dan 1500 rpm dari 8-10 sekon. Torsi beban yang diberikan adalah sebesar 3 Nm. Hasil simulasi untuk kecepatan referensi berubah dan beban tetap untuk motor BLDC dengan SSTPI ditunjukkan pada gambar 4.27-4.29.



Gambar 4.27 Respon kecepatan motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah beban tetap

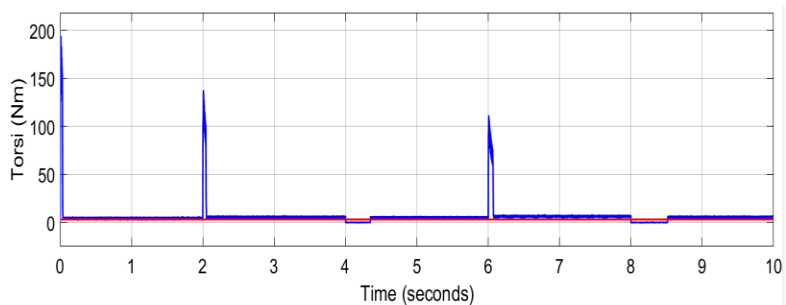


(a)



(b)

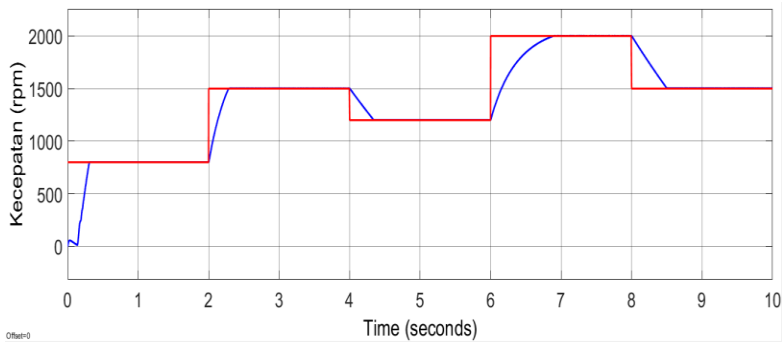
Gambar 4.28 (a) Arus motor BLDC dengan SSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah dan beban tetap
(b) Arus pada rentang 6,06-6,16 detik



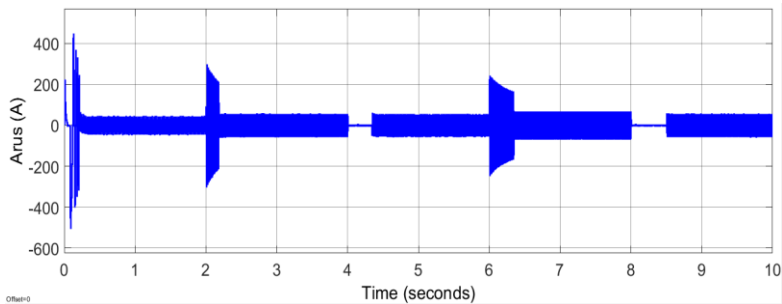
Gambar 4.29 Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah dan beban tetap
(merah : torsi beban; biru : torsi elektromagnetik)

Saat terjadi perubahan kecepatan, terjadi lonjakan arus pada stator. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadinya percepatan, diperlukan torsi yang lebih besar, sehingga V_{dc} menyuplai arus pada stator. Sedangkan ketika terjadi penurunan kecepatan torsi bernilai nol, karena pengereman regeneratif tidak disimulasikan.

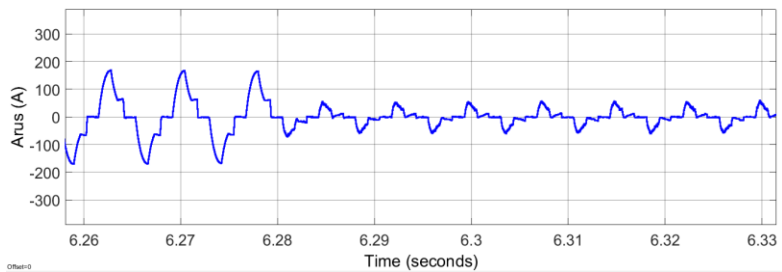
Hasil simulasi untuk kecepatan berubah dan tanpa beban untuk motor BLDC dengan FSTPI ditunjukkan pada gambar 4.30-4.32.



Gambar 4.30 Respon kecepatan motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah beban tetap

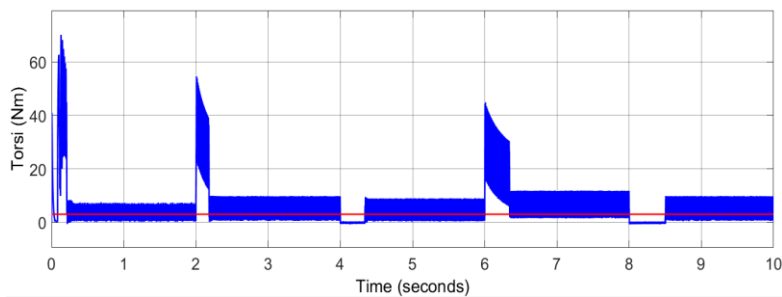


(a)



(b)

Gambar 4.31 (a) Arus motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah dan beban tetap
(b) Arus dalam rentang 6,26-6,33 detik

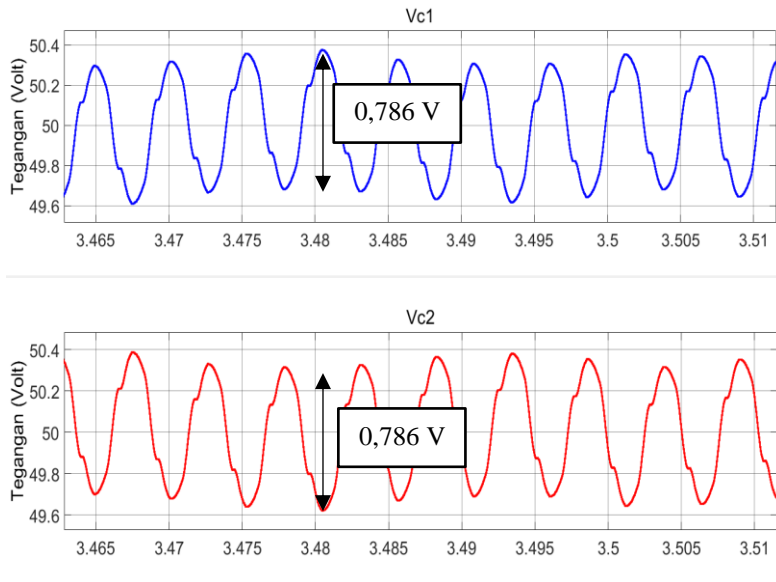


Gambar 4.32 Torsi motor BLDC dengan FSTPI sistem *close loop* dengan kecepatan referensi berubah dan beban tetap
(merah : torsi beban; biru : torsi elektromagnetik)

Saat terjadi perubahan kecepatan, terjadi lonjakan arus pada stator. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadinya percepatan, diperlukan torsi yang lebih besar, sehingga Vdc menyuplai arus pada stator. Sedangkan ketika terjadi penurunan kecepatan torsi bernilai nol, karena pengereman regeneratif tidak disimulasikan.

4.4 Analisa Gelombang Kapasitor

Berdasarkan perhitungan kapasitor di bab 3, untuk mendapat *ripple* tegangan sebesar 1,1 V dibutuhkan kapasitor sebesar 33mF. Setelah melakukan simulasi didapatkan gelombang kapasitor seperti gambar 4.33.



Gambar 4.33 Gelombang tegangan kapasitor C1 dan C2

Berdasarkan gambar 4.33, *ripple* tegangan kapasitor C1 dan C2 bernilai sama, hanya berbeda polaritasnya. *Ripple* tegangan kapasitor hasil simulasi nilainya lebih kecil daripada *ripple* yang diinginkan saat perancangan komponen. Hal ini disebabkan oleh motor yang tidak bekerja pada *rating*-nya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *ripple* tegangan desain adalah *ripple* tegangan maksimal yang mungkin terjadi.

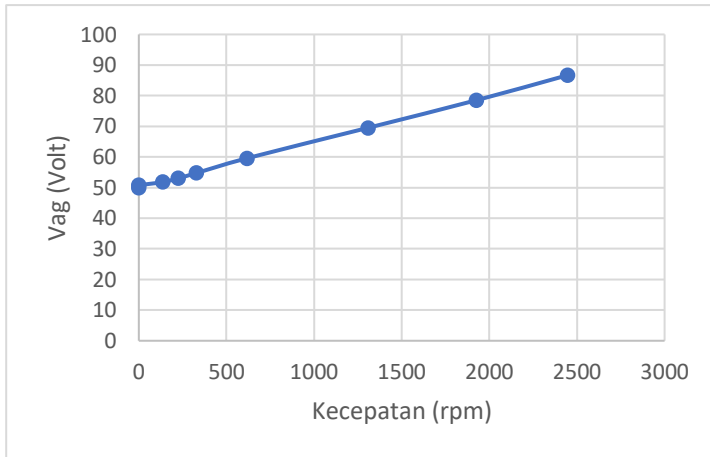
4.5 Analisa V/f pada Motor BLDC dengan *Four Switch Three Phase Inverter (FSTPI)*

Pada simulasi kali ini, dilakukan pengambilan data untuk mengetahui karakteristik kontrol skalar, yaitu dengan membandingkan tegangan yang masuk ke motor dan kecepatan aktual motor. Data simulasi ditunjukkan oleh tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data simulasi karakteristik V/f

Vref	duty	Vag	RPM	Wact
100	1	94,5	2899	303,6
90	0,9	86,66	2445	256
80	0,8	78,5	1925	201,6
70	0,7	69,5	1307	136,9
60	0,6	59,56	616,2	64,5
50	0,5	54,74	327,8	34,32
40	0,4	53	223,9	23,44
30	0,3	51,79	135,1	14,4
20	0,2	50,72	0,6994	0,0734
10	0,1	50	0,2122	0,0222
0	0	50	0	0

Berdasarkan tabel 4.1, apabila tegangan motor dinaikkan, maka kecepatan yang dihasilkan pun akan berubah. Maka, besar tegangan sebanding dengan besarnya kecepatan motor. Grafik karakteristik V/f ditunjukkan pada gambar 4.34.



Gambar 4.34 Grafik karakteristik V/f

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melaksanakan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Kontrol kecepatan skalar untuk motor BLDC dengan FSTPI memiliki kekurangan yaitu membutuhkan sumber tegangan lebih besar daripada motor BLDC dengan SSTPI untuk mencapai kecepatan yang sama. Dengan nilai catu daya yang sama, motor BLDC dengan FSTPI hanya bisa mencapai 52,89% kecepatan motor BLDC dengan SSTPI pada kondisi beban penuh.
2. Kontrol kecepatan skalar FSTPI lebih cocok untuk digunakan pada motor BLDC berdaya kecil, karena semakin besar daya motor, semakin besar kapasitas kapasitor yang dibutuhkan.
3. Pada penelitian ini, nilai kapasitor yang menghasilkan kecepatan optimum yaitu pada rentang 18mF sampai 36mF.
4. Motor BLDC dengan FSTPI dan SSTPI memiliki performa yang hampir sama. Hal ini dibuktikan dengan sedikitnya selisih *error* kecepatan *steady state* rata-rata motor BLDC dengan FSTPI dan SSTPI yaitu 0,298% dan 0,25%.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Untuk mendapatkan kecepatan sesuai dengan kecepatan rating, diperlukan proses penguatan tegangan.
2. Untuk mendapatkan bentuk arus yang lebih baik, perlu ditambahkan kontrol arus pada sistem.

Halaman ini sengaja dikosongkan

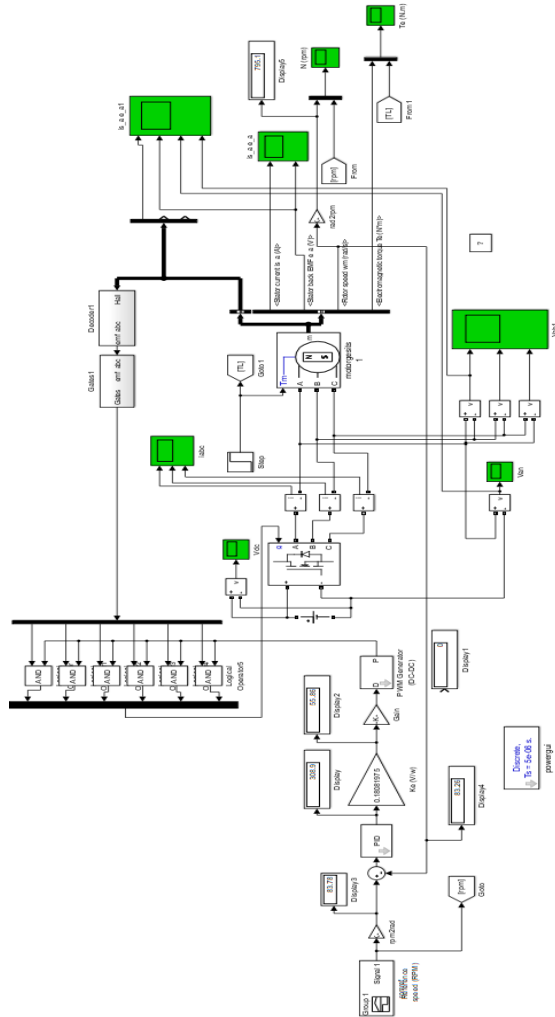
DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Naga Santosh dan Dr. N. Prema Kumar, "Modelling of Brushless DC Motor using PID, PWM and Cascaded Controllers," *IJISSET - Int. J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 4, hlm. 236–242, Jun 2014.
- [2] vinod Kr Singh Patel dan A.K.Pandey, "Modeling and Simulation of Brushless DC Motor Using PWM Control Technique," *Int. J. Eng. Res. Appl. IJERA*, vol. 3, no. 3, hlm. 612–620, Jun 2013.
- [3] Juhi Nishat Ansari dan Sapna L, "Speed Control of BLDC motor for Electric Vehicle," *Int. J. Eng. Res. Technol. IJERT*, vol. 3, no. 5, hlm. 1666–1671, Mei 2014.
- [4] J.-I. Itoh, N. Nomura, dan H. Ohsawa, "A comparison between V/f control and position-sensorless vector control for the permanent magnet synchronous motor," 2002, vol. 3, hlm. 1310–1315.
- [5] V. Krishnakumar dan S. Jeevanandhan, "Four switch three phase inverter control of BLDC motor," 2011, hlm. 139–144.
- [6] Jian Zhao dan Yangwei Yu, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note," *MPS*, Jul 2011.
- [7] Stefan Baldursson, "BLDC Motor Modelling and Control-A Matlab/Simulink Implementation," 2005.
- [8] Yashvi Parmar, Priyanka Patel, Nitiksha Pancholi, Chand Thakor, dan Unnati Mali, "Scalar control of Permanent Magnet Synchronous motor," *Int. Res. J. Eng. Technol. IRJET*, vol. 03, no. 12, hlm. 364–366, Des 2016.
- [9] Yashvant Jani, "Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motors Part 1." Renesas Technology America, Inc.
- [10] M. Ebadpour, M. B B Sharifian, dan M. R. Feyzi, *A Cost-Effective Position Sensorless Control for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Drives Using Single Current Sensor*, vol. 4. 2011.
- [11] S. Ekmen, B. Fincan, dan M. Imeryuz, "A BLDC motor drive with four switch three phase inverter," 2016, hlm. 804–808.
- [12] Changliang Xia, Zhiqiang Li, dan Tingna Shi, "A Control Strategy for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Using Single Current Sensor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, hlm. 2058–2066, Jun 2009.

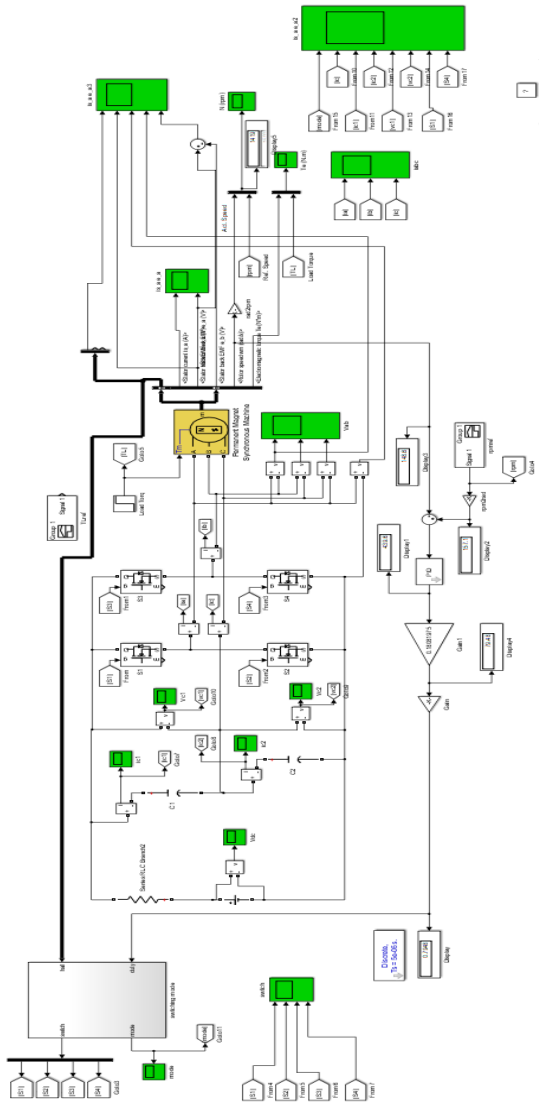
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Sistem SSTPI



Sistem FSTPI



BIODATA PENULIS



Tyas Sarnaning Maharani dilahirkan di Pacitan, 05 Agustus 1996. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN 01 Pandean Madiun, SMP Negeri 2 Madiun, SMA Negeri 2 Madiun hingga lulus pada tahun 2014. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan studi perguruan tinggi tingkat sarjana di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Di Teknik Elektro, penulis mendalami bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama masa kuliah, penulis

aktif sebagai pengurus organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro sebagai Sekretaris selama 2 tahun. Selain itu, sejak tahun 2016 penulis menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik dengan bidang Mesin Listrik, Elektronika daya dan *Renewable Energy*. Penulis dapat dihubungi melalui email tyass.maharani@gmail.com